



## ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

*А.Гайосо де лос Сантос, З.Павлова, А.Темников,  
А.Федоров, ООО FEDAL, Санкт-Петербург*

**Повышение энергетики лазеров с диодной накачкой ведет к увеличению числа матриц лазерных диодов в каждом канале лазера. Разработан источник для питания диодных матриц, подключенных последовательно.**

**И**дея использовать высокоэнергетический лазер для зажигания термоядерного горючего излучением принадлежит советским академикам Николаю Геннадиевичу Басову и Олегу Николаевичу Крохину [1,2].

Ряд уникальных свойств, которыми обладают лазеры, позволили применить их в качестве источника концентрированной энергии для инициирования термоядерных реакций. Это, во-первых, дает возможность создать в фокусе лазерного луча высокую плотность потока энергии, что, соответственно, ведет к сверхмощному удельному энерговыделению, достаточному для ионизации материала мишени и получения плазмы. Во-вторых, отсутствие механической связи между лазером и мишенью позволяет расположить выходные каскады лазерных систем на расстоянии в несколько десятков метров от локализации термоядерных микровзрывов. Таким образом, появилась возможность подвести к мишени огромную мощность, не вызывая разрушения конструкционных материалов установки. В-третьих, конструкция лазера может обеспечить высокую контрастность излучения, то есть большое отношение энергии полезного сигнала к энергии шума. Ведь хорошо известно, что при функционировании ультрамощных лазеров по разным причинам возникает фоновое шумовое излучение различной длительности. И, как любое излучение, находящееся во всякой усилительной системе, оно может привести к предварительному нагреву и разрушению материала мишени до прихода основного импульса [3].

В ведущих центрах Советского Союза – ФИАН, ФИАЭ (ТРИНИТИ), ВНИИЭФ, ГОИ им.С.И.Вавилова, НИИЭФА им.Д.В.Ефремова были начаты работы

## POWER SUPPLIES DIODE-PUMPING LASERS FOR LASER FUSION

*A.Gayoso de los Santos, Z.Pavlova, A.Temnikov,  
A.Fedorov, FEDAL Ltd, St.-Petersburg*

**Increased power diode-pumped lasers energetics leads to the increase of the number of diode laser matrixes at each channel. A power supply that can power parallel connected diode arrays was designed.**

**T**he idea of using high-power laser emission for thermonuclear fuel implosion belongs to Soviet academician N.G. Basov and O.N. Krohin.

Lasers have a number of unique properties that are allowed to use them as a source of thermonuclear implosion. Firstly it gives an ability to create a high energy flux density at the laser beam focus and therefore high power specific energy release in the matter. Secondly, an absence of mechanical linking between the laser and the target; output stages of laser systems may be in tens of meters from thermonuclear implosions that allows provide to at target a huge energy without destroying of structural materials. Thirdly, it gives an ability to provide high contrast radiation, that is large signal-to-noise ratio, which are always in laser, as in any amplification system, and can lead to the preheating and the target destruction before the main pulse appearing.

In the leading centers of the Soviet Union - LPI RAS, State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research, Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Federal State Unitary Enterprise Scientific and Industrial Corporation "Vavilov State Optical Institute", Joint Stock Company «D.V.Efremov Institute of Electrophysical Apparatus» have started works of creating of experimental facilities for experimentations of interaction processes of high-energy laser radiation with matter and solving problems of laser fusion (LF). 2009 year instigates a new round of the facilities development, intended for LF. In Lawrence Livermore National Laboratory, USA, started 192-beam laser system National Ignition Facility (NIF) with an output energy of 1.8 MJ. A similar system - Laser Mega Joule (LMJ) in France - is scheduled for completion in 2014. NIF and LMJ predecessors were: Nova and Omega (USA), Vulcan (UK), FIREX (Japan), SG (China) and photolytically pumped iodine gas laser Iskra-5 (Russian Federation). Up to 2020 Russia plans to construct of laser facility of megajoule energy level.

по созданию экспериментальных установок для проведения исследований процессов взаимодействия лазерного излучения высоких энергий с веществом и решения проблем лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). 2009 год ознаменовал собой новый виток в развитии установок, предназначенных для ЛТС [4, 5]. В Ливерморской лаборатории США была запущена 192-пучковая лазерная установка National Ignition Facility (NIF) с выходной энергией 1,8 МДж. Аналогичная установка Laser Mega Joule (LMJ) во Франции планируется к завершению в 2014 году. Предшественниками NIF и LMJ были: Nova и Omega (США), Vulcan (Великобритания), FIREX (Япония), SG (Китай), а также фотодиссоционная йодная установка Искра-5 (Россия) [2]. К 2020 году Россия планирует построить лазерную установку мегаджоулевого класса УФЛ2М (рис.1).

В лазерных установках, функционирующих на данный момент, для демонстрационных экспериментов зажигания выбрана наиболее надежная, но наименее эффективная схема непрямого сжатия с преобразованием лазерного излучения в рентгеновское. Она обеспечивает наилучшую однородность облучения и устойчивость сжатия мишеней. Для генерации энергии предпочтение отдают прямому сжатию. В такой схеме коэффициент усиления в мишенях достигает величины ~100 при полной энергии около 2 МДж, с учетом того, что КПД лазера должен быть  $\geq 6-7\%$ . Лазер-драйвер для удовлетворения технических и экономических требований к энергетической установке должен бесперебойно

Up-to-date laser systems for demonstration experiments ignition are based on the most reliable, but least effective indirect compaction scheme by laser emission to X-ray radiation, providing the best uniformity and stability of the target compaction. For energy production direct compaction is preferred, where gain in the target is near 100 and is reached at full power for about 2 MJ, and laser efficiency must be  $\geq 6-7\%$ . Laser driver must have uninterrupted operation with a pulse repetition frequency of  $\geq 5$  Hz for 2 years performing  $\geq 3 \cdot 10^8$  pulses to meet the technical and economic requirements for the power facility. The most advanced facilities for solving this problem are solid state diode-pumped lasers (Diode Pumped Solid State Lasers - DPSSL) and gas KrF lasers with a relativistic electron beam pumping, keeping the necessary high efficiency and can be scaling to the required energy.

Obviously, one of the most effective solutions to creating high-power solid-state laser consists in principle of a multi-channel construction. The laser, in this case, "gathering" in shape of a lattice of identical channels, each of which occurs laser generation. Small cross-section of the channels allows efficiently and simply accomplish the energy pumping into the active medium and the heat rejection from its scope. Company «Northrop Grumman» built 100-kilowatt laser in the same way. Basic principles of multi-channel systems of power diode-pumped lasers are discussed in "Electrical Power Supply systems for multi-channel diode-pumped lasers" Photonics 2014 1 (43).

In the design of laser systems increased power diode-pumped lasers leads to increase of number diode laser

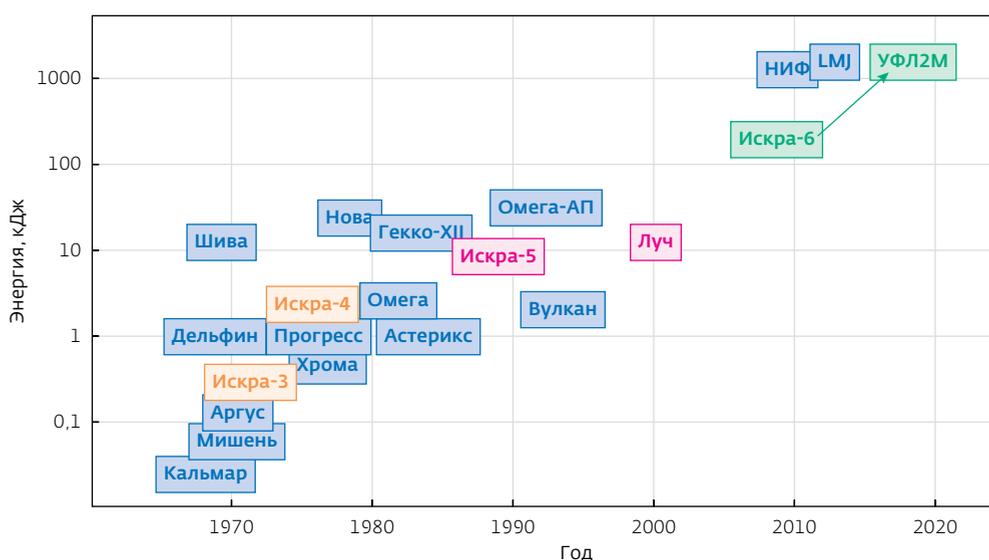


Рис.1. Лазерные установки для изучения физики высоких плотностей энергии  
Fig.1. Laser systems for the high energy density physics researchs.

работать с частотой повторения импульсов  $\geq 5$  Гц в течение 2 лет, производя  $\geq 3 \cdot 10^8$  импульсов. Наиболее перспективными для решения данной задачи являются твердотельные лазеры с диодной накачкой (Diode Pumped Solid State Lasers – DPSSL) и газовые KrF-лазеры с накачкой релятивистским электронным пучком. Эти лазеры обладают необходимой высокой эффективностью и могут быть масштабированы до требуемых энергий [6].

Очевидно, что одно из наиболее эффективных решений создания высокомоощных твердотельных лазеров состоит в многоканальном принципе их построения. Лазер в этом случае "набирается" в виде решетки идентичных каналов, в каждом из которых происходит лазерная генерация. Малое поперечное сечение каналов позволяет эффективно и просто осуществить накачку энергии в активную среду и отвод тепла из ее объема. По такой схеме построен 100-кВт лазер фирмы "Northrop Grumman" [4]. Основные принципы построения систем электропитания многоканальных лазеров с диодной накачкой были рассмотрены нами ранее [см. журнал Фотоника, 2014, №1 (43)].

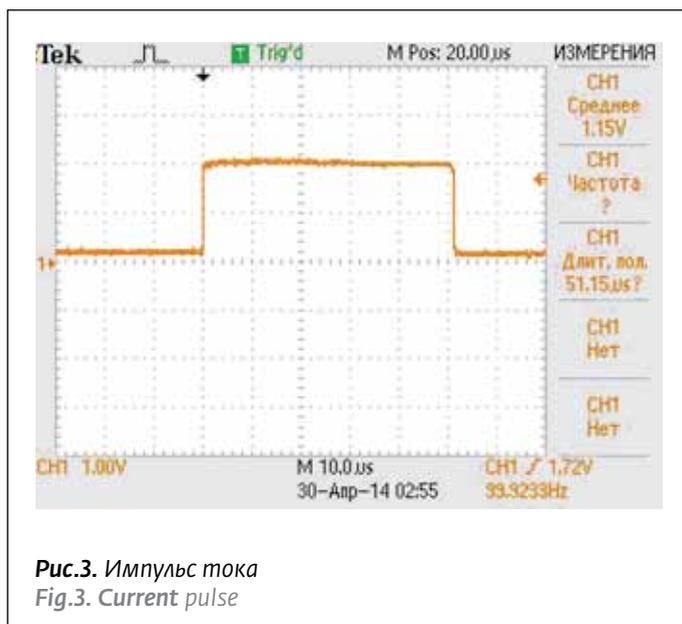
Повышение энергетики лазеров с диодной накачкой ведет к тому, что при проектировании лазерных установок возрастает количество матриц лазерных диодов (МЛД) в каждом канале лазера. Тут же возникают проблемы подключения большего количества матриц к источнику питания (ИП), обслуживающему лазерный канал. Схемные решения, которые использует на данный момент компания ООО "ФЕДАЛ" при производстве серийной продукции, основаны на частичном разряде емкостного накопителя энергии (ЕНЭ). Это приводит к ограничению падения напряжения на последовательно включенных матрицах. Компактность ИП с ЕНЭ достигается во многом за счет выбора электролитических конденсаторов в качестве накопителя. Максимальное рабочее напряжение такого вида конденсаторов лимитировано величиной 450 В, что, в свою очередь, накладывает ограничение на возможность использовать большое количество МЛД, подключаемых к ИП последовательно. Если воспользоваться пленочными полипропиленовыми конденсаторами, это вызывает увеличение значения возможного падения напряжения на МЛД. Но такое решение приведет к неизбежной необходимости работать с ИП значительно больших размеров. Да и с точки зрения повышения безопасности увеличение напряжения в накопителе ИП нежелательно.

Существует решение, позволяющее подключать МЛД параллельно, но тут возникает



**Рис.2.** Устройство выравнивания тока в матрицах PLD 100  
*Fig.2. Laser-diode matrix edcuation unit*

matrixes (MLD) at each channel. Appears problems connecting to the wide quantities of matrices to a power supplies (PS), supplying a laser channel. Circuit design, that nowadays company "FEDAL" applies in the manufacture of typical products, based on partial discharge capacitive energy storage (CES), thus it leads to limitation of the voltage drop across the series-connected arrays. Compact PS with CES achieved due to using as the storage electrolytic capacitors. The maximum operating voltage of this type is limited to 450 V. This makes a limit on the possible number of MLD connected



**Рис.3.** Импульс тока  
*Fig.3. Current pulse*



затруднение – необходимо выравнивание их по току. Компания FEDAL решила эту техническую задачу и разработала устройство для выравнивания тока на 3, 6 и 9 матриц (PLD 100), которое с успехом применяется. Но порой возникают ситуации, когда для реализации проекта требуется установить еще большее количество МЛД. Однако, как показали результаты экспериментов, проведенных сотрудниками компании, с ростом количества матриц, подключаемых к устройству, понижается стабильность выравнивания тока. И, в конце концов, подключение большого количества МЛД к устройству PLD 100 может значительно снизить общий КПД источника питания.

Для устранения проблемы, возникшей на пути реализации технического решения, компания приступила к разработке ИП, основанный на частичном разряде индуктивного накопителя энергии (ИНЭ). ИП такого типа обладает выходной характеристикой источника тока что идеально подходит для питания нагрузки с нелинейной вольт-амперной характеристикой. При использовании этого источника, ток в нагрузке не зависит от количества последовательно включенных МЛД. Принятое инженерное решение оказалось верным в пределах средней выходной мощности, на которую рассчитан ИП. Использование ИП с ИНЭ исключает необходимость применения конденсаторов большой емкости.

Однако большим недостатком ИП с ИНЭ остается крайне низкий КПД. Для улучшения этого показателя можно принять меры – например, существенно снизить омическое сопротивление накопителя. Но обычно это приводит к огромным экономическим затратам из-за включения в конструкцию

to the power supplies successively. Using polypropylene film capacitors would increase the possible voltage drop across the MLD, but this solution leads to a much larger power supplies. Increase in drive voltage of power supply is unwanted.

There is a solution that allows to connect MLD in parallel, current in them should be necessarily aligned. The device for smoothing current, that uses for parallel connection of 3, 6, 9 laser diode arrays, has been developed and successfully applied by the company, but there are cases more quantity MLD are needed. The "FEDAL" engineers' experiments has shown, under increasing of MLD quantity, stability of current aligning decreases. Connecting to a large number of MLD to the device PLD 100 can significantly reduce the overall efficiency of the power supply. In response to this problem company has concluded to develop of power supply, based on partial discharge of inductive energy storage (INE). The power supply of this type has the output characteristics of the current source, which is ideal for powering the load with nonlinear current-voltage characteristic. In using such solutions, the load current does not depend on the number of parallelly connected within the MLD average output power, which power supply is designed for. Power supply and INE don't use large capacitors.

It is his great fault of power supply and INE extremely low efficiency. To improve this indicator measures can be taken to substantially reduce the ohmic drive, which usually leads to enormous economic costs (cooled to extremely low temperatures). Another way to increase efficiency is to use INE with energy recovery in the pause between pulses. Such schematic, providing such a mode, was designed, simulated and led to prototype. The prototype was successfully tested, it have allowed to



устройства элементов охлаждения до предельно низких температур. Другой путь повышения КПД предусматривает использование ИНЭ с рекуперацией энергии в момент паузы между импульсами. Схемное решение, обеспечивающее такой режим, было разработано, промоделировано и реализовано в макетном исполнении. Положительные результаты, полученные при испытаниях на макете, позволили начать подготовку к серийному производству ИП, работающих на описанном принципе (рис.2). На разработанные в процессе создания ИП схемные решения компания FEDAL получила три патента.

Расчет КПД преобразователя показал, что при питании от трехфазной сети система имеет достаточный КПД – 70%. Его с легкостью можно увеличить при условии использования повышающего преобразователя для заряда буферной емкости. По нашим оценкам, в таком случае расчетный КПД схемы может достичь 91%. При этом КПД ИП не зависит от частоты следования импульсов, что немало важно для заказчиков.

Прямоугольная форма импульса достигается применением пассивной корректирующей цепи. Данное решение лишено недостатков активной коррекции, которые могут проявляться при больших мощностях. Импульс тока, полученный на макете ИП, представлен на рис.3.

Разработанный ИП предназначен для питания диодных матриц, подключенных последовательно. Суммарное падение напряжения на МЛД ограничено только элементной базой и габаритами источника. Существующие в свободном доступе ключевые элементы обеспечивают выходной ток 90 А при падении напряжения на нагрузке до 1200 В.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Басов Н.Г. и др. Физика лазерного термоядерного синтеза. – М.: Знание, 1988.
2. Гаранин С.Г. И все-таки мы его зажжем. – Атомная стратегия, 2011, №55, с.22–23.
3. Sangster T.C. et al. – Nucl. Fusion, 2007, 47, S686.
4. Moses E.I. – IFSA 2009 Program, Sep. 6–11, 2009, San Francisco, USA, p.175.
5. Lion C., Ebrardt J. – IFSA 2009 Program, Sep. 6–11, 2009, San Francisco, USA, p.177.
6. Зворыкин В.Д. Импульсно-периодические DPSSL и KrF лазерные драйверы для энергетических установок на основе термоядерного синтеза. – Материалы XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 2010.

start pre-production of such power supplies series. Were obtained three patents to the schematics, getting during the process of power supplies creation.

Converter efficiency calculation showed that system has sufficient efficiency – 70% by powering from three-phase network. It easily can be increased using a boost converter to charge the buffer capacitor. In this case, the calculated efficiency scheme can reach 91%. While power supply efficiency does not depend on the frequency of the pulse, which is important for customers.

Rectangular pulse shape is achieved by using passive correction circuit. This decision is without flaws of active correction that may occur at high power. The current pulse produced by power supply model is shown in Picture 3.

Designed power supply allows to power connected in parallel diode arrays. The total voltage drop across the MLD is limited only by the components and dimensions of the power supply. Existing in free access key elements allow to provide output current 90A under the voltage across the load to 1200V.

## "ЛАЗЕРНО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ, БИОЛОГИИ, ГЕОЭКОЛОГИИ И ТРАНСПОРТЕ – 2014"

Приглашаем принять участие в XXII Международной конференции "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте", которая пройдет 8–12 сентября 2014 года в Морском государственном университете имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, Новороссийск, Краснодарский край, Россия, проспект Ленина, 93.

### Тематика конференции:

- Лазеры в медицине, биологии и геоэкологии;
- Лазерные технологии на транспорте;
- Системы обработки и анализа изображений и сигналов;
- Компьютерные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте;
- Геотехнологии;
- Нанотехнологии в медицине и биологии;
- Техносферная безопасность;
- Геоэкологический мониторинг;

Регистрация участников и прием тезисов конференции открыты до 31 июля 2014 года на сайте: [www.abrauconf.avtec.ru/zayavka.php](http://www.abrauconf.avtec.ru/zayavka.php). Председатель оргкомитета Вадим Евгеньевич Привалов, д.т.н., проф., 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, С-ПбГПУ, РФФ, [vaevpriv@yandex.ru](mailto:vaevpriv@yandex.ru). Заместитель председателя оргкомитета Владимир Антонович Туркин, д.т.н., проф., 353918, Новороссийск, проспект Ленина, 93, ГМУ им. адмирала Ф.Ф.Ушакова, тел. (8617) 767838, факс (8617)717273, [turkin@nsma.ru](mailto:turkin@nsma.ru);

А.Шикина Анна Юрьевна (ученый секретарь), тел. (8617) 767838, факс (8617) 717273, [anutka93rus@mail.ru](mailto:anutka93rus@mail.ru).