

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1175/83

16/3-83

9-82-866

Ю.А.Быковский, Ю.П.Козырев, К.И.Козловский,
А.М.Кучер, С.М.Булатов, А.С.Цыбин

РАЗРАБОТКА
ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ
С ВЫХОДОМ 10^{10} Н/С

Направлено в журнал
"Приборы и техника эксперимента"

1982

ВВЕДЕНИЕ

Создание интенсивных управляемых и транспортабельных источников нейтронов, несмотря на значительное количество имеющихся разработок, является, с точки зрения конкретного использования нейтронных потоков, весьма актуальной задачей. Наиболее интенсивные транспортабельные источники с управляемым выходом нейтронов выполняются, как правило, в виде малогабаритных ускорителей с плазменными источниками ионов изотопов водорода^{1/}. Реализация эффективных параметров такого генератора в значительной степени определяется возможностями источника ионов.

Исследования взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом позволили разработать эффективные лазерно-плазменные источники для ряда физико-технических устройств^{2/}. Специфика лазерного образования плазмы в ионном источнике состоит в том, что к малому объему вещества $/10^{-8} \div 10^{-6} \text{ см}^3/$ за короткое время $/10^{-8} \div 10^{-7} \text{ с}/$ подводится сравнительно большая энергия $/10^{-2} \div 1 \text{ Дж}/$, что позволяет эффективно нагревать и практически полностью ионизовать на поверхности мишени сгусток плазмы с начальной плотностью $10^{20} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$. При быстром разлете этой плазмы происходит сохранение или "закалка" ионизационного состояния части ионного компонента, содержащей $10^{14} \div 10^{15}$ ионов различной зарядности. Причем большая часть "закаленных" ионов летит по направлению нормали к мишени в телесном угле $\sim 0,4 \pi$. Это позволяет использовать такую лазерную плазму в качестве источника ионов. В отличие от других источников ионов лазерный позволяет достичь на порядок лучшее преобразование подводимой к нему энергии в энергию ионизационного состояния ионов и их кинетическую энергию.

Возможность успешного использования лазерного ионного источника в малогабаритном генераторе нейтронов подтвердили исследования, проведенные на первых макетах генератора с использованием реакции $D(d, n)He^{3/3/}$. Результатом этих исследований явилось получение выхода нейтронов с энергией $\sim 2,5 \text{ МэВ}$ на уровне 10^6 нейтр./имп. и потока при частоте следования импульсов $12,5 \text{ Гц} \sim 10^7$ нейтр./с. Эксперименты показали, что эффективное преобразование лазерной энергии для образования и нагрева плазмы, возможность получения сгустка с большим количеством дейтронов, направленность разлета сгустка, простота эмиттирующей части - все эти качества ионного источника при условии эффективного извлечения дейтронов из плазмы и их последующего ускорения до энергии $150 \div 200 \text{ кэВ}$ раскрывают перспективу создания импульсного генератора нейтронов /ЛГН/, превосходящего по своим параметрам аналогичные современные генерато-

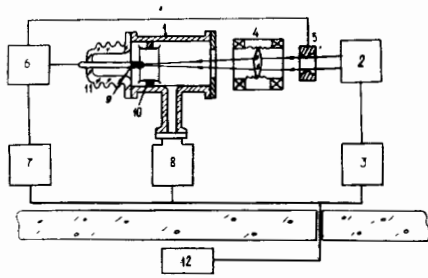


Рис.1. Схема лазерного генератора нейтронов. 1 - ускорительная камера, 2 - лазерный излучатель, 3 - блок питания лазера, 4 - фокусирующее устройство, 5 - разрядник, коммутирующий высоковольтный ускоряющий импульс, 6 - источник ускоряющего напряжения, 8 - вакуумный насос, 9 - лазерная мишень, 10 - нейтронообразующая мишень, 11 - высоковольтный изолятор, 12 - пульт управления ЛГН.

ры. На рис.1 представлена принципиальная схема лазерного генератора нейтронов. Он состоит из следующих основных элементов: вакуумной ускорительной камеры, лазера, устройства фокусировки лазерного излучения, источника ускоряющего напряжения, а также устройства синхронизации лазерного и ускоряющего импульсов.

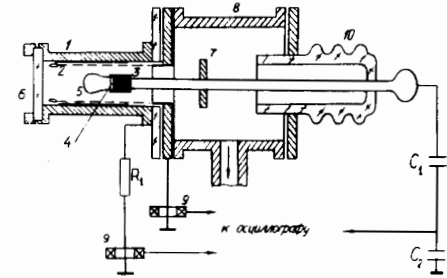
В настоящей работе приводятся результаты проводимых на базе ЛЯР ОИЯИ последующей разработки и исследования лазерного генератора нейтронов с использованием реакции $T(d,n)He^4$. Особое внимание было уделено вопросам реализации эффективного частотного режима и увеличения ресурса, что потребовало существенного усовершенствования источника ускоряющего напряжения, исследования теплового режима лазерной мишени и анодной части ускоряющей системы с разработкой конструкции анода, а также создания устройства для фокусировки и сканирования лазерного излучения по плазмообразующей мишени.

ОПИСАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ

Схема разработанного макета экспериментального ЛГН аналогична приведенной на рис.1. Излучателем нейтронов в генераторе фактически является ускорительная камера, схематический разрез которой представлен на рис.2. Система ускоряющих электродов состоит из цилиндрического катода 1, внутренняя поверхность которого представляет собой нейтронообразующую мишень из $TiD_{1,6}$, сетчатого цилиндрического электрода 2 и цилиндрического анода, внутри которого размещена плазмообразующая лазерная мишень 4 из $ZrD_{1,4}$. Как показали многочисленные экспериментальные исследования конфигураций анода, существенное улучшение работы ускорительной системы, особенно в частотном режиме, было достигнуто за счет анодной вставки из двух тонких U-образных вольфрамовых электродов 5. Их использование в несколько раз уменьшило ток ускоренных вторичных электронов на лазерную мишень, что ранее приводило к ее разогреву и последующей десорбции дейтерия при температуре мишени свыше

Рис.2. Ускорительная камера.

1 - катод, 2 - антидинаatronная сетка, 3 - анод, 4 - лазерная мишень, 5 - вольфрамовые U-образные проволочки, 6 - оптический ввод, 7 - диск, защищающий изолятор, 8 - камера, 9 - пояса Роговского, 10 - корпус.



$300^{\circ}C$. Кроме того, наблюдаемое уменьшение эрозии сплошной металлической части анода и сеточного тока /в 1,5 раза/ дает основание предположить, что при использовании такой конструкции может происходить частичная реализация отражательного режима работы /часть электронов проходит сквозь анодную вставку и летит к противоположной части катода/. Наконец, тепловое излучение разогретой до $2000^{\circ}C$ анодной вставки разгружает мощность, подводимую к сплошному аноду вторичными электронами, что облегчает режим его работы с дейтериевой мишенью. Оценка выделенной на аноде мощности при частоте следования импульсов 25 Гц дала величину ~ 50 Вт, причем основная часть этой мощности выделялась на вольфрамовом электроде. В разработанной конструкции анода используется также принудительное водяное охлаждение, что позволяет надеяться на реализацию требуемого теплового режима и при частотах следования $\geq 10^2$ Гц.

Мощность, выделяемая током ионов на нейтронообразующей мишени, - того же порядка, что и указанная выше для анода. Однако развитая поверхность катодного электрода ~ 100 см² и непосредственный контакт с камерой практически не требовали его принудительного охлаждения /при большей частоте следования импульсов ≥ 100 Гц на катоде также потребуется водяное охлаждение нейтронообразующей мишени/.

В ЛГН был использован промышленный частотный лазер ЛТИ-5 с энергией в импульсе $E_{\text{л}} \leq 0,05$ Дж и длительностью импульса $\tau_{\text{л}} = 15$ нс. Фокусировка излучения лазера линзой с фокусным расстоянием ~ 10 см позволяла получить плотность мощности на поверхности мишени $q \leq 7 \cdot 10^9$ Вт/см².

Такие параметры воздействия лазерного излучения на мишень из $ZrD_{1,4}$ дают возможность получить плазменный сгусток, содержащий $\sim 5 \cdot 10^{13}$ дейтронов за импульс с длительностью разлета до катода ~ 1 мкс. Применение же лазерной мишени из $ZrD_{1,4}$ предпочтительнее по сравнению с мишенями из $TiD_{1,4}$ и $(CD_2)_n$, что экспериментально обнаружено по увеличению выхода нейтронов. Рост выхода нейтронов, как следует из осциллограмм ионного тока, обусловлен меньшей скоростью разлета плазмы и, соответственно, более оптимальными условиями для извлечения дейтронов /увеличивается длительность импульса тока/.

Эффективная работа ЛГН в реальных условиях требует ускорения дейтронов до энергии 150÷200 кэВ. Разработанный для генератора источник ускоряющего напряжения был выполнен на базе импульсно-малогабаритного трансформатора с амплитудой импульсов до 200 кВ при токовой нагрузке до 50 А. Длительность ускоряющего импульса на уровне 0,9 амплитуды составляла 750 нс, а длительность фронта не превышала 250 нс. Источник может работать в режиме с частотой следования импульсов ≥ 100 Гц.

Ускоряющий импульс и ионный пакет, инжектируемый в ускоряющий промежуток, имеют ограниченную длительность и в ЛГН приблизительно одинаковы ~ 1 мкс/. В этой связи весьма важной является временная синхронизация лазерного и ускоряющего импульсов. В разработанном ЛГН предусмотрено использование двух вариантов синхронизации со стабильностью не хуже 50 нс на основе электронной схемы с тиратронами и применения лазерного воздушного разрядника, как показано на рис.1.

Для первого варианта синхронизации характерны возможность регулировки в широком диапазоне относительного следования синхронизируемых импульсов и возможность работы в режиме с большей частотой следования импульсов. Второй вариант обеспечивает автоматическую коммутацию высоковольтной цепи и достаточно прост, но позволяет осуществлять относительный сдвиг синхронизируемых импульсов лишь в небольшом ~ 200 нс/ временном диапазоне.

Срок службы и стабильность работы ионного источника ЛГН в значительной степени определяются эффективностью сканирования лазерного излучения по плазмообразующей мишени. Специально разработанное для генератора устройство сканирования и, одновременно, фокусировки обеспечивает достаточно равномерное перемещение точки фокусировки по мишени площадью ~ 1 см². Схема устройства сканирования и фокусировки, в основе которой лежит принцип перемещения фокусирующей линзы в плоскости, перпендикулярной оси лазерного луча, показана на рис.3.

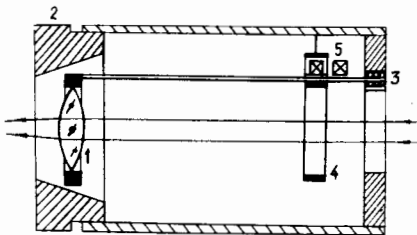


Рис.3. Сканирующее и фокусирующее устройство ЛГН. 1 - линза, 2 - ограничитель амплитуды колебаний, 3 - упругое крепление, 4 - кольцо из магнитного материала, 5 - электромагниты.

Исследование основных характеристик ЛГН проводилось путем измерения токов в электродной системе, импульсов ускоряющего напряжения и регистрации нейтронного выхода. Токвые измерения осуществлялись двумя поясами Роговского, как показано на рис.2. Контроль

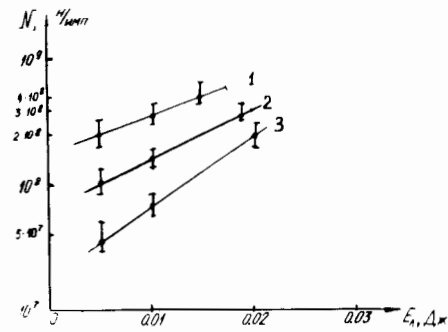


Рис.4. Зависимость нейтронного выхода от энергии лазерного импульса в режиме работы с частотой 25 Гц. 1 - $U = 150$ кВ, 2 - $U = 120$ кВ, 3 - $U = 100$ кВ.

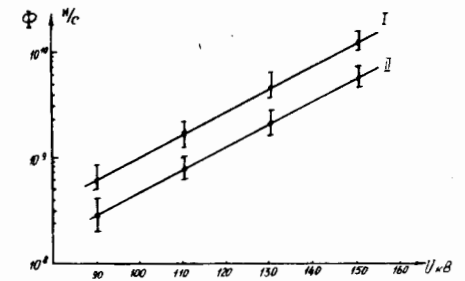


Рис.5. Зависимость нейтронного потока от ускоряющего напряжения /частота следования импульсов - 25 Гц/. 1 - $E_{л} = 0,015$ Дж, 2 - $E_{л} = 0,01$ Дж.

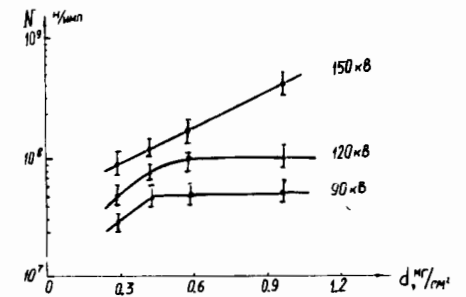


Рис.6. Зависимость нейтронного выхода от толщины нейтронообразующей мишени.

ускоряющего напряжения проводился емкостным делителем с предварительной калибровкой при помощи шарового разрядника. Регистрация и контроль выхода нейтронов осуществлялись тремя методиками: всеволновым или "длинным" счетчиком, активацией быстрыми нейтронами медного образца /реакция $Cu^{63}(n,2n)Cu^{62}$ / и активацией тепловыми нейтронами индиевой таблетки с последующим измерением активности на установке малого фона.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЯ ЛГН

Результаты измерений выхода и потока нейтронов в зависимости от энергии лазерного импульса и ускоряющего напряжения представлены на рис.4 и 5. Рис.6 иллюстрирует влияние толщины нейтронообразующей мишени на выход нейтронов, что позволяет оптимизировать работу генератора по величине ускоряющего напряжения. Следует отметить, что полученные данные хорошо согласуются с результатами^{15/} для традиционных генераторов нейтронов.

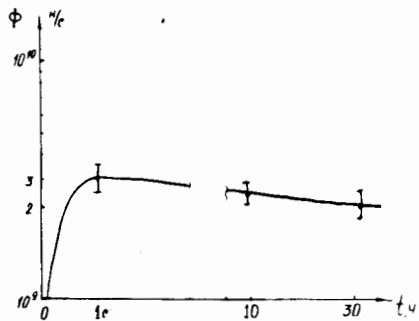


Рис.7. Зависимость нейтронного потока от времени работы ЛГН.

Испытания ЛГН показали работоспособность всех элементов генератора в течение 30 ч при частоте следования импульсов 12,5 Гц и 25 Гц. На рис.7 представлен график зависимости потока нейтронов от времени работы генератора при следующих параметрах: $E_d = 0,01$ Дж,

$V = 125$ кВ, $f = 12,5$ Гц, лазерная мишень - $ZrD_{1,4}$, нейтронообразующая мишень - $TiTi_{1,6}$. Характерные амплитуды тока ионов и тока на сетчатый электрод составляли соответственно 10 и 6 А. Ток дейтронов в импульсе при этом составлял величину ~ 3 А, а средний их ток ~ 150 мкА. Согласно^{5/}, при энергии ускорения дейтронов ~ 150 кэВ, это соответствует выходу $\sim 10^{10}$ нейтр./с, что подтверждает данные измерений по активации медной фольги быстрыми нейтронами.

Анализ полученных данных и результатов испытаний, сравнение их с аналогичными данными по традиционным генераторам подтверждают основные преимущества ЛГН, такие, как:

- высокий импульсный выход нейтронов,
- высокое процентное отношение ионов дейтерия в полном токе ионов /в первую очередь, по сравнению с генераторами с искровым ионным источником/,
- сравнительно более низкий разогрев ионного источника,
- возможность работы с частотой следования импульсов более 100 Гц /искровой - 20 ± 40 Гц/.

Кроме того, анализ полученных результатов показывает, что использование более эффективного лазера /с частотой $f \geq 100$ Гц и энергией в импульсе $0,05 \pm 0,2$ Дж, см., например,^{16/}, увеличение ускоряющего напряжения до 200 ± 300 кВ, применение более оптимальных по составу лазерной /например, эрбиевой/ и нейтронообразующей мишеней с разработанной ускоряющей системой /рис.2/ позволит реализовать нейтронный выход вплоть до 10^{11} нейтр./с без существенного изменения теплового и вакуумного режимов ЛГН.

В указанной традиционной схеме ускорения ионов внешним электрическим полем, как известно, имеется ограничение на плотность извлекаемого тока ионов, определяемое законом "трех вторых"¹¹. Вследствие этого в электродной системе ЛГН плотность тока не превышает $\sim 0,5$ А/см²; а плотность нейтронов - 10^8 нейтр./см².с. По той же причине невозможно увеличить количество ускоренных ионов за счет роста энергии лазерного импульса. Оценка эмиссионной способности лазерно-плазменного источника ионов показывает, что при энергии $0,1 \pm 1$ Дж плотность тока ионов на расстояниях 1 ± 3 см от мишени может составлять $\sim 10 \pm 100$ А/см². Эксперименты, проведенные ранее в МИФИ, показали возможность получения из лазерной плазмы

интенсивных потоков ускоренных ионов в диоде с магнитной изоляцией /ДМИ/^{7/}. Основным отличием ускоряющей системы на основе ДМИ является присутствие магнитного поля, направленного вдоль оси цилиндрического катода. Его величина выбирается так, чтобы ларморовский радиус ускоренных ионов был примерно равен расстоянию между лазерной плазмой у анода и катодом. Тогда ларморовский радиус для электронов будет много меньшим и они не смогут ускользнуть по направлению к аноду. На основе использования ДМИ при энергии лазерного импульса $\leq 0,4$ Дж в экспериментах достигнута плотность извлекаемого ионного тока ≥ 10 А/см² при энергии ускорения ~ 150 кэВ. Нейтронный выход /реакция $D(d,n)He^3$ / составлял 10^7 нейтр./имп.

В настоящей работе на аналогичной системе ускоряющих электродов ДМИ реализован режим работы с частотой повторения импульсов 25 Гц. Это стало возможным благодаря применению разработанной системы из постоянных SmCo-магнитов с максимальной индукцией поля ~ 3 кГс. С использованием реакции $T(d,n)He^4$ при энергии лазерного импульса 0,015 Дж получен поток нейтронов 10^{10} нейтр./с при вакуумном режиме не хуже $2 \cdot 10^{-5}$ Тор. Этот результат подтвердил перспективу увеличения нейтронного выхода и за счет увеличения энергии импульсов частотно-периодических лазеров при сохранении габаритов системы ускоряющих электродов.

Разработка ЛГН, способного работать в течение нескольких часов при сохранении высокого выхода, позволила провести первые эксперименты по его использованию для нейтронно-активационного анализа веществ. В ходе этих экспериментов оценена чувствительность анализа с помощью ЛГН элементов золота и урана, составившая величину на уровне 10^{-6} г/г. Такая чувствительность сравнима с достигаемой на более крупногабаритных генераторах и источниках нейтронов, таких, как НГ-150, микротрон, Sb-Be источник.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и испытан малогабаритный макет низковольтного генератора нейтронов с лазерным источником дейтронов, работающий по реакции $T(d,n)He^4$. Достигнут поток нейтронов на уровне 10^{10} нейтр./с при частоте следования микросекундных импульсов 25 Гц/с ускоряющим напряжением 130 кВ/. Разработка анода с эффективной тепловой защитой и устройства для сканирования и фокусировки излучения на лазерной мишени позволили увеличить ресурс ЛГН с 10^4 до 10^7 импульсов при частоте их следования 25 Гц. Намечены пути увеличения нейтронного выхода ЛГН до 10^{11} нейтр./с при сохранении транспортабельных габаритов. Наконец, показана возможность использования лазерного генератора нейтронов для активационного анализа.

Авторы выражают глубокую благодарность академику Г.Н.Флерову за постоянное внимание к работе и ценные рекомендации, Ю.Ц.Оганесяну и Ю.С.Замятнину за поддержку работы, а также Е.М.Жмаеву, А.Г.Белову, Ю.Г.Тетереву за техническую и научную помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессарабский Ю.Г., Овсянников С.Б., Стасова М.М. Зарубежная электронная техника, 1975, вып.22/18/, с.23.
2. Быковский Ю.А. и др. В кн.: Тезисы докладов XII Европейской конференции по взаимодействию лазерного излучения с веществом. ВНИИЦ, М., 1978, с.220.
3. Беспалов Д.Ф., Быковский Ю.А. и др. ПТЗ, 1978, 16, с.19.
4. Беспалов Д.Ф. и др. Авторское свидетельство СССР № 580725, от 21.06.76 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1979, № 48, с.224.
5. Guillaume M., Delfiore G. Nucl.Instr. and Meth., 1971, vol.92, No.4, p.571.
6. Баранов В.Ю. и др. Квантовая электроника, 1981, т.8, № 9, с.1909.
7. Быковский Ю.А. и др. Физика плазмы, 1981, т.7, вып.5, с.1024.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 декабря 1982 года.

Быковский Ю.А. и др. 9-82-866
Разработка лазерного генератора нейтронов с выходом 10^{10} н/с

Описан разработанный в ЛЯР ОИЯИ макет малогабаритного генератора нейтронов с энергией 14 МэВ и выходом 10^{10} н/с, в котором используется лазерный источник дейтронов. Дейтроны ускорялись до 130 кВ в течение микросекундных импульсов, следующих с частотой до 25 Гц. Достигнут ресурс непрерывной работы лазерного генератора нейтронов /ЛГН/ до 30 ч. Показана возможность увеличения нейтронного выхода ЛГН до 10^{11} н/с при сохранении малогабаритности. На основе экспериментов по использованию ЛГН для нейтронно-активационного анализа оценена чувствительность определения золота и урана на уровне 10^{-6} г/г.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Bykovsky Yu.A. et al. 9-82-866
A Laser Neutron Generator for 10^{10} n/s Yield

A compact neutron generator for the production of 14 MeV neutrons and 10^{10} n/s yield is described. A laser ion source is used for production of deuterons. Deuterons are accelerated to 130 MeV in a microsecond pulses and frequency of 25 Hz. The feasibility of increasing the neutron yield to 10^{11} n/s is demonstrated at the same compactness of device. The sensitivity of determining Au and U was estimated to equal 10^{-6} g/g, when the laser neutron generator is used for neutron activation analysis.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.