

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

Г 4

P9-88-629

Ю.П.Гангрский, Н.В.Зубков\*,  
М.В.Кириллов-Угрюмов\*, К.И.Козловский\*,  
А.М.Кучер, В.А.Прорвич\*

**ГЕНЕРАТОР  
НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НЕЙТРОНОВ  
НА ОСНОВЕ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ  
ИОНОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ**

Направлено в "Журнал технической физики"

\*Московский инженерно-физический институт

**1988**

1. Для решения ряда задач, связанных с измерением полных сечений ядерных реакций на быстрых нейтронах, приводящих к образованию изотопов с периодом полураспада менее 100 нс, и моделирования нейтронных измерений на установках термоядерного синтеза необходимы генераторы нейтронов наносекундной длительности с выходом более  $10^9$  нейтр./имп. Такой генератор можно создать, используя эффект коллективного ускорения ионов в сильноточном электронном пучке (СЭП). Существует несколько схем коллективного ускорения ионов в СЭП, которые, в основном, различаются способами создания ионов и позволяют получать короткие ( $\sim 10$  нс) и интенсивные ( $\sim 10^{13}$ ) импульсы ионов<sup>1/</sup>. Однако возможности использования коллективных ускорителей как источников коротких мощных нейтронных импульсов в необходимом объеме еще не изучены.

В настоящей работе сообщаются результаты экспериментов по измерению выхода нейтронов, определению геометрии разлета, энергетического спектра ускоренных ионов и временных характеристик нейтронного излучения коллективного ускорителя дейтронов, источником ионов в котором служит лазерная плазма.

Первые эксперименты по коллективному ускорению ионов лазерной плазмы в СЭП были проведены авторами работы<sup>2/</sup>. В настоящее время исследования в этом направлении активно развиваются<sup>3/</sup>. Интерес к такой схеме ускорения определяется возможностью использования лазерной плазмы в качестве анода электронной пушки, который можно многократно воспроизводить в заданный момент времени и с определенной плотностью, что, в свою очередь, определяет ресурс и стабильность работы такого ускорителя.

В отличие от<sup>2,3/</sup>, в нашем случае ток и энергия электронов СЭП при той же длительности импульса меньше в 5 - 7 раз (импульсная мощность, соответственно, меньше в 30 - 50 раз). Это позволяет существенно уменьшить габариты установки и снизить уровень сопутствующего рентгеновского излучения.

2. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе со следу-

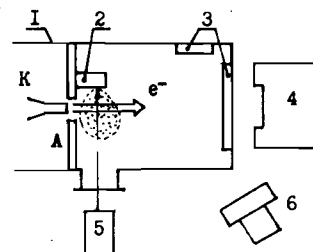
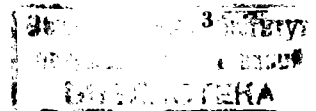


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - вакуумная (ускорительная) камера, 2 - лазерная мишень, 3 - нейтронообразующая мишень, 4 - всеволновый детектор, 5 - лазер с системой фокусировки, 6 - сцинтилляционный детектор, К и А - соответственно катод и анод электронной пушки.

щими параметрами СЭП:  $I_e = 5 - 7$  кА,  $E = 200$  кэВ,  $\tau_e = 30$  нс, диаметр пучка электронов на входе в ускорительную камеру  $\sim 1$  см. Плазма создавалась непосредственно за отверстием в аноде электронной пушки при фокусировке излучения лазера типа ЛТИ-5 ( $E_d = 30$  мДж,  $\tau_d = 12$  нс) на поверхность мишени из  $TiD$  (или  $ZrD$ ). Вакуум в ускорительной камере поддерживался на уровне  $2 \cdot 10^{-5}$  Торр. Длина и диаметр камеры за анодом 20 см. Интегральный выход нейтронов за импульс  $Y_n$  измерялся всеволновым детектором и пороговым активационным медным детектором. Для генерации нейтронов использовались реакции  $D(d,n)He^3$  и  $T(d,n)He^4$ , соответствующие мишени устанавливались в различных точках камеры (рис. 1). Погрешность измерений  $Y_n$  приблизительно 50%. Временные характеристики импульсов нейтронов измерялись сцинтилляционным детектором, состоящим из пластмассового сцинтиллятора ( $\varnothing 375$  мм,  $l = 175$  мм) и ФЭУ-63. Проверка работоспособности детектора и его калибровка осуществлялась с помощью лабораторных изотопных источников, естественного космического излучения и светодиода  $AlPO_2B$ . Для нейтронов с энергией 14 МэВ эффективность детектора при пороге 200 кэВ (с учетом светособирания и конверсионной эффективности) составляет величину  $\approx 50\%$ . В качестве регистратора использовался осциллограф С8-12. Временное разрешение всего измерительного тракта составляло величину  $\approx 15$  нс. Параметры электронного пучка измерялись с помощью емкостных делителей, шунтов обратного тока и поясов Роговского. Генератор нейтронов работал с частотой до 1 Гц.

3. Для варьирования плотности плазмы в районе анода с целью определения оптимального режима ускорения между импульсом лазерного излучения и импульсом электронного пучка вводилась задержка. Величина задержки  $\tau_3$  менялась в пределах 0,1 - 3,0 мкс. На рис. 2 представлена зависимость выхода нейтронов  $Y_n$  из мишени  $CD_2$  диаметром 120 мм, расположенной на торце ускорительной камеры, от  $\tau_3$ . Макси-



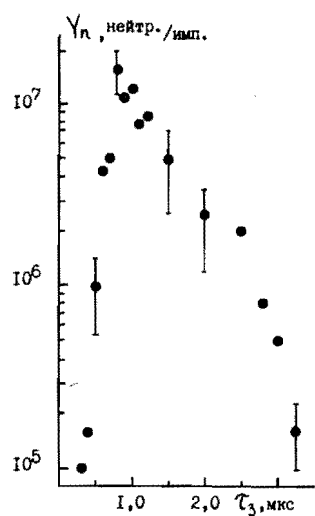


Рис. 2. Зависимость выхода нейтронов из мишени  $CD_2$   $\varnothing$  120 мм от задержки.

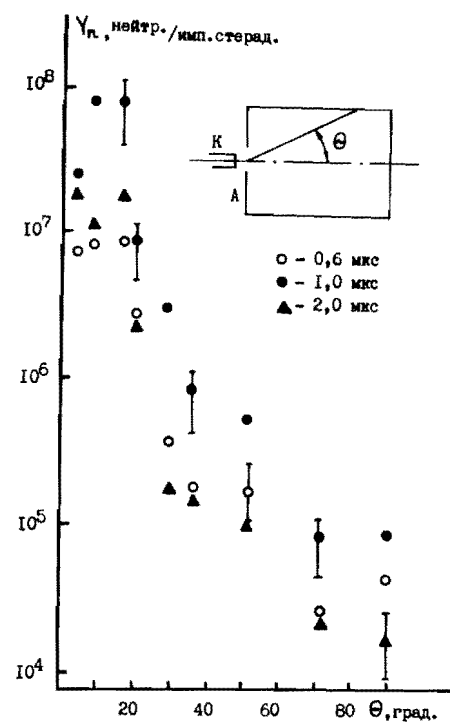


Рис. 3. Распределение выхода нейтронов.  $\circ$  —  $\tau_3 = 0,6$  мкс,  $\bullet$  —  $\tau_3 = 1,0$  мкс,  $\blacktriangle$  —  $\tau_3 = 2,0$  мкс.

мум наблюдается в области задержек  $\tau_3 \approx 1$  мкс. Средняя плотность ионов лазерно-плазменного сгустка при этом составляет величину  $\approx 2 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ , что всего в 2 – 3 раза больше плотности молекул остаточного газа, а плотность атомов плазмы – на 1 – 2 порядка выше. Плотность ионов в плазме определялась с помощью коллекторов, устанавливаемых в различных точках камеры в районе анодного отверстия. Средняя плотность атомов в плазме оценивалась по среднему выносу вещества лазерной мишени за импульс. На рис. 3 показана зависимость выхода нейтронов на единицу площади нейтронообразующих мишеней, устанавливаемых на стенках камеры под различными углами  $\Theta$  при различных  $\tau_3$ . Видно, что основная масса ионов ускоряется в пределах угла  $\Theta \approx 20^\circ$  и характер распределения по углу практически не зависит от  $\tau_3$ . Максимум  $Y_n$  для любой мишени, независимо от ее

расположения ( $\Theta$ ), наблюдается при  $\tau_3 \approx 1$  мкс. Измерения длительности нейтронного импульса  $\tau_n$  и энергетического распределения проводились для группы ионов, ускоряющихся в пределах  $\Theta \approx 20^\circ$ .

Энергетические распределения для различных  $\tau_3$  получены путем измерения нейтронного выхода из  $CD_2$ -мишени, накрываемой тонкими ( $0,4$  мг/см $^2$ ) лавсановыми пленками. Соответствующие результаты приведены на рис. 4. Этот способ дает очень приблизительное представление

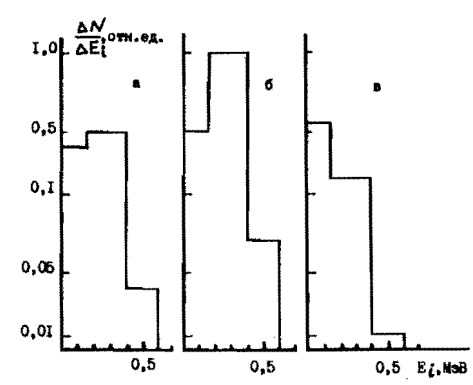
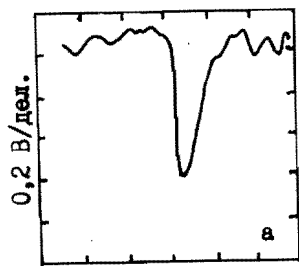


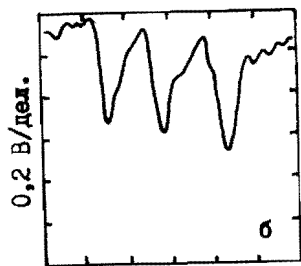
Рис. 4. Энергетические распределения ускоренных ионов при различных значениях  $\tau_3$ : а – 0,6 мкс, б – 1,0 мкс, в – 2,0 мкс.

о реальном энергетическом спектре, но позволяет оценить число ускоренных до энергии  $E_i > E_0 \approx 200$  кэВ дейтронов и проследить изменение их числа в зависимости от режима ускорения (плотности лазерной плазмы). Из рис. 4 видно, что максимальное число ионов  $D^+$  с энергией  $E_i > E_0$  соответствует  $\tau_3 \approx 1$  мкс. Общее число дейтронов с  $E_i > 200$  кэВ составляет величину порядка  $10^{13}$ , т.е. 10 – 20% от полного числа ионов дейтерия в лазерной плазме. Коэффициент перевода энергии пучка электронов в энергию пучка ионов приблизительно 5%.

4. Форма и длительность импульса нейтронного излучения (реакция  $T(d,n)He^4$ ) исследовались с помощью сцинтилляционного детектора. Интегральный выход нейтронов контролировался всеволновым детектором и пороговым медным счетчиком. Сцинтилляционный детектор для подавления сигнала от прямого и рассеянного рентгеновского излучения размещался вне помещения ускорителя за стальной дверью толщиной 60 см. Амплитуда сигнала рентгеновского излучения при этом не превышала 0,1 В. Измеренная длительность нейтронного импульса в диапазоне задержек  $\tau_3 = 0,5 \div 1,5$  мкс оставалась практически постоянной и составляла величину  $\tau_n \approx 30$  нс (рис. 5 а). При  $\tau_3 = 1,5 \div 2,5$  мкс приблизительно в 50% измерений регистрировались 2 – 3 последовательных импульса нейтронов с периодом  $\approx 100$  нс (рис. 5 б). Это можно объяснить следующим образом. При больших задержках происходит заполнение диода электронной пушки плазмой, что приводит к понижению его



50 нс/дел.



100 нс/дел.

Рис. 5. Осциллограммы импульсов нейтронного излучения при различных задержках: а - 1,0 мкс, б - 2,2 мкс.

импеданса. В таком режиме в накопительной емкости электронного ускорителя возникают релаксационные колебания и, как следствие, генерируется несколько электронных пучков с периодом  $\approx 100$  нс, что и приводит к появлению нескольких импульсов нейтронов (рис. 5 б).

Максимальный интегральный выход нейтронов в реакции  $T(d,n)He^4$ , измеренный всеволновым детектором и с применением активационной методики при  $\tau_3 \approx 1$  мкс, составил величину соответственно  $2 \cdot 10^8$  и  $10^8$  нейтр./имп.

Ресурс работы генератора ограничивается ресурсом катода электронной пушки и составляет величину порядка  $10^3$  импульсов.

#### Литература

1. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. - ЭЧАЯ, 1983, т. II, вып. I, с. 71.
2. Destler W.W., Uhm H.S., Kim H., Reiser M.P. - J. Appl. Phys., 1979, v.50(5), p.3015.
3. O'Shea P.G., Destler W.W., Roger J. - Appl. Phys. Lett., 1986, v.49(25), p.1696.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 сентября 1988 года.

Гангрский Ю.П. и др.

P9-88-629

Генератор наносекундных импульсов нейтронов на основе коллективного ускорителя ионов лазерной плазмы

Разработан экспериментальный макет наносекундного генератора нейтронов. Режим коллективного ускорения ионов лазерной плазмы, образованной импульсом лазера с энергией 30 мДж и длительностью 12 нс, реализован в вакууме с использованием пучка электронов с энергией 200 кэВ, током 5-7 кА и длительностью 30 нс. Выход нейтронов за импульс в реакциях  $D(d,n)^3He$  и  $T(d,n)^4He$  составил, соответственно, величину  $\approx 10^7$  и  $10^8$  нейтр./имп. Длительность импульса нейтронов составила величину менее 30 нс. Регистрация большого количества  $/10^{13}/$  ускоренных дейтронов с энергией более 200 кэВ указывает на возможность эффективного коллективного ускорения ионов при сравнительно малой  $/\sim 1$  ГВт/ мощности электронного пучка.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Gangrskij Yu.P. et al.

P9-88-629

Nanosecond Pulse Neutron Generator Based on Collective Ion Accelerator

The model of nanosecond neutron generator has been designed. The regime of collective acceleration of ions of laser plasma produced by laser pulse with 30 mJ energy and 12 ns duration was realized in vacuum with the use of 200 keV electron beam 5-7 kA current, 30 ns duration. Neutron yield per pulse in  $D(d,n)^3He$  and  $T(d,n)^4He$  reactions was  $\approx 10^7$  and  $10^8$  neutron/pulse, respectively. Duration of neutron pulse was less than 30 ns. Registration of a great number ( $10^{13}$ ) of accelerated deuterons with an energy higher than 200 keV points to a possibility of effective collective ion acceleration at a comparatively small ( $\sim 1$  GW) power of electron beam.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988