

04;12

Генерация нейтронов при импульсном разряде в дейтерии

© М.И. Ломаев, Г.Н. Дудкин, Б.А. Нечаев, В.Н. Падалко,
Д.А. Сорокин, В.Ф. Тарасенко, А.П. Яловец

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: lomaev@loi.hcei.tsc.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: nechaev@tpu.ru

Южноуральский государственный университет, Челябинск

E-mail: yalovets@physicon.susu.ac.ru

Поступило в Редакцию 19 января 2010 г.

Исследована генерация нейтронов при импульсном разряде в неоднородном электрическом поле в дейтерии. Показано, что при давлении дейтерия единицы Torr генерация нейтронов наблюдается при использовании не только дейтерированных катодов, но также и катодов, не содержащих дейтерия.

В настоящее время во многих работах ставится задача по созданию компактных источников нейтронов с ультракороткими временами излучения и максимально возможным выходом нейтронов. Такие источники перспективны при исследовании кинетики ядерных реакций, трансмутации в условиях „нейтронного взрыва“ [1]. Для создания указанных источников используют импульсные разряды в дейтерии с металлическим катодом, насыщенным дейтерием или тритием [2,3], а также пикосекундные и фемтосекундные лазеры [1,4]. В работах [2–4] положительный эффект был достигнут только при использовании электродов или образцов, обогащенных дейтерием или тритием. В [2] генерация нейтронов при использовании дейтерированных катодов

отличалась сильной нестабильностью. Максимальный выход нейтронов при этом составил $\sim 10^3$ нейтронов за импульс при давлении дейтерия 1–2 Торг. В случае катода, обогащенного тритием, вследствие большого значения величины сечения реакции DT при энергиях не более 1 MeV выход нейтронов достигал $\sim 2 \cdot 10^4$ нейтронов за импульс при давлении дейтерия ~ 3 Торг.

Цель данной работы — исследование возможности получения нейтронов при разряде в дейтерии без использования электродов, обогащенных тритием или дейтерием. Кроме того, ставилась задача повысить эффективность генерации нейтронов при использовании дейтерированного катода.

В экспериментах использовалась установка, состоящая из импульсного генератора, газонаполненного диода и системы регистрации. Генератор наносекундных импульсов РАДАН-220 имел волновое сопротивление накопительной линии 20Ω и формировал на высокоомной нагрузке импульс напряжения с амплитудой ~ 220 kV. Длительность импульса напряжения на согласованной нагрузке составляла ~ 2 ns, а длительность фронта импульса напряжения в передающей линии ~ 0.5 ns. Конструкция разрядной камеры была подобна описанной ранее (см. рис. 1 в работе [5]). Газовый диод имел внутренний диаметр металлического корпуса ~ 50 mm и откачивался форвакуумным насосом до давления менее 0.1 Торг. Потенциальным электродом, полярность которого можно было менять, служила трубка диаметром ~ 6 mm из стальной фольги толщиной $100 \mu\text{m}$. В качестве второго электрода (плоского) использовались металлические пластины, покрытые слоем дейтерированного циркония или титана. Толщина покрытия, полученного методом магнетронного распыления циркония или титана в атмосфере дейтерия, была порядка $1 \mu\text{m}$. Рентгенографический анализ показал, что содержание дейтерия в кристаллитах покрытия соответствует стехиометрии ZrD_2 и TiD_2 . В ряде экспериментов в качестве плоского электрода использовались образцы из меди, которые не были обогащены дейтерием. Камера откачивалась и заполнялась дейтерием или воздухом. Исследования проводились при давлениях газов от 0.1 Торг до 1 atm. Напряжение на промежутке регистрировалось емкостным делителем, установленным на расстоянии 6 cm от разрядного промежутка в передающей линии генератора, ток разряда — шунтом, собранным из малоиндуктивных чип-резисторов.

Для регистрации нейтронов, получаемых в результате $d(d, n)^3\text{He}$ -реакции, использовался ^3He -детектор (нейтронный детектор), раз-

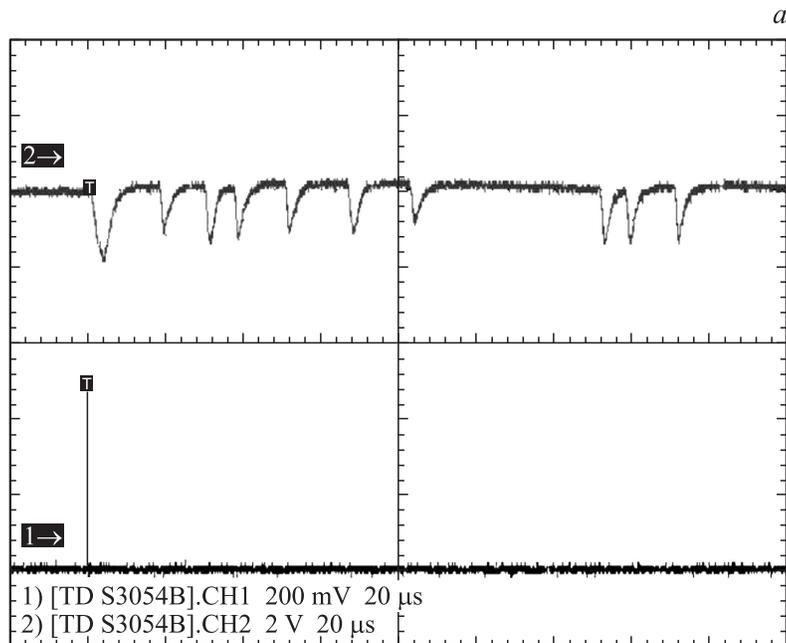


Рис. 1. Осциллограммы импульса нейтронов с ^3He -детектора: ZrD_2 -мишень, межэлектродный зазор $d = 5$ mm, давление дейтерия $p \sim 1$ Torr (*a*); временное распределение числа зарегистрированных нейтронов N по всем сериям эксперимента (*b*).

работанный в ОИЯИ (Дубна). Детектор состоит из 10 счетчиков тепловых нейтронов, заполненных смесью $^3\text{He} + \text{Ar} + \text{CO}_2$, окруженных замедлителем из полиэтилена. Размер активной части детектора $480 \times 270 \times 90$ mm. Конструкция и характеристики детектора подробно описаны в работе [6]. Детектор располагался в 30 см от мишени и был защищен от мощного рентгеновского импульса слоем свинца толщиной 7 см. В этой геометрии эффективность регистрации нейтронов с энергией ~ 2.5 MeV составила $0.0058 \pm 15\%$. Сигнал с нейтронного детектора регистрировался цифровым осциллографом TDS 3054B. Поскольку время жизни нейтрона в детекторе составляет $\sim 57 \mu\text{s}$ [6], был выбран интервал регистрации $t = 180 \mu\text{s}$. Вероятность регистрации нейтрона в

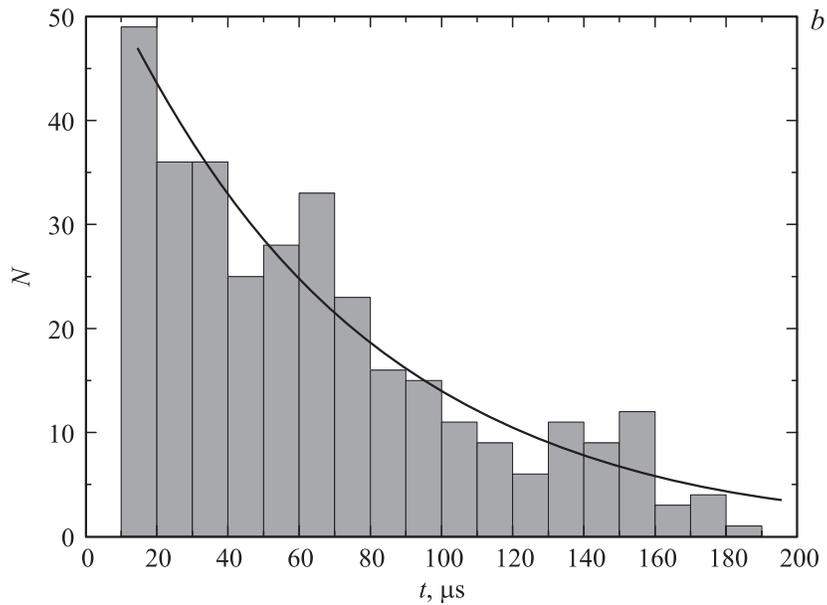


Рис. 1 (продолжение).

этом временном интервале составляет $\sim 95\%$. Запуск осциллографа осуществлялся синхроимпульсом, в качестве которого использовался сигнал с емкостного делителя напряжения.

Типичные осциллограммы сигнала синхроимпульса (канал № 1, положение сигнала отмечено меткой „Г“) и нейтронного детектора (канал № 2) приведены на рис. 1, *a*. Подсчет нейтронов осуществляется в интервале от метки „Г“ до конца интервала регистрации, за исключением первого импульса, вызванного мощным рентгеновским излучением, сопровождающим высоковольтный разряд. На рис. 1, *b* представлены временное распределение моментов регистрации нейтронов по всей совокупности измерений и аппроксимация гистограммы спадающей экспонентой (сплошная линия). Величина характерного времени спада экспоненты ($67 \pm 8 \mu\text{s}$) близка к значению, приведенному в [6] для времени жизни нейтрона в детекторе. Это является важным фактом, указывающим на то, что детектором регистрируются именно нейтроны.

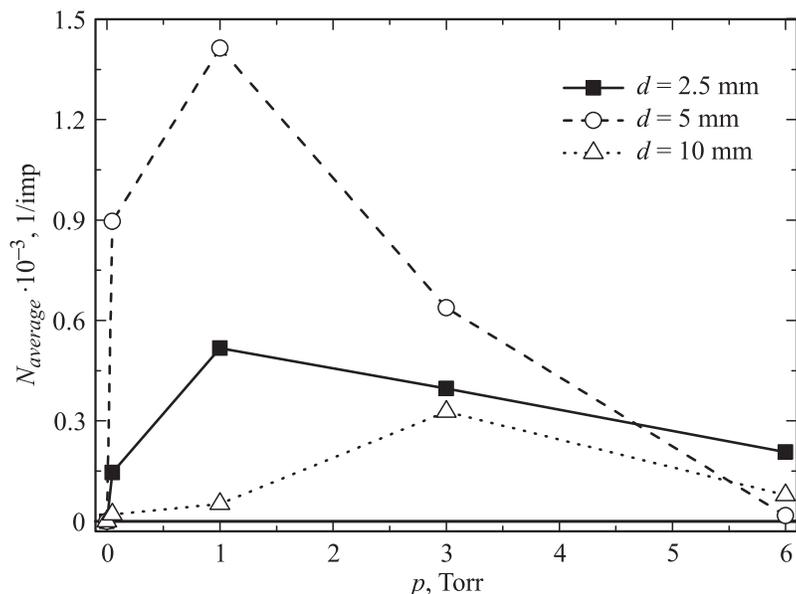


Рис. 2. Зависимость среднего числа выхода нейтронов $N_{average}$ от давления дейтерия p и величины межэлектродного зазора d при использовании в качестве катода ZrD_2 -мишени.

Измерение выхода нейтронов проводилось на различных мишенях при разных значениях давления дейтерия и межэлектродного расстояния, а также при изменении полярности потенциального электрода. Выход нейтронов был зафиксирован при давлении дейтерия в диапазоне от единиц до ~ 10 Торг при различных материалах плоского электрода (мишени), при условии, что плоский электрод был катодом. На рис. 2 приведены зависимости выхода нейтронов от давления дейтерия и величины межэлектродного промежутка. Максимальное число нейтронов — 13 нейтронов в импульсе было зарегистрировано при использовании катода-мишени из ZrD_2 при давлении дейтерия ~ 1 Торг. С учетом эффективности детектора выход нейтронов из мишени за один импульс в этом случае достигает ~ 2200 нейтронов. Условия проведения этой серии являются оптимальными для достижения максимального выхода нейтронов и стабильности от импульса к импульсу. Сравнительный

анализ с данными работы [7] показал, что указанный выход нейтронов возможен при токе ускоренных (до 150 keV) ионов дейтерия ≥ 100 А.

Выход нейтронов ~ 0.5 на 1 импульс (без учета эффективности детектора) надежно зафиксирован также с катодами-мишенями, не содержащими дейтерий, что указывает на возможность генерации нейтронов в разрядном объеме.

Фотография автографа разряда на катоде демонстрирует его четкую кольцевую форму, причем диаметр и ширина кольца соответствуют размерам трубчатого анода. Поскольку автограф разряда на катоде есть следствие эмиссии из него электронов в газ, то, принимая во внимание геометрию анода, можно сделать вывод о формировании в данном эксперименте разряда, имеющего цилиндрическую геометрию, при которой основной ток разряда течет по образующей цилиндра, толщина которой соответствует толщине цилиндрического анода и составляет 0.1 mm.

Очевидно, что динамика газа в разрядном промежутке (5 mm) определяется только энергией разряда, выделившейся в газе (давление 1 Torr). Удельная мощность энерговыделения при разряде была взята на основании данных [5], где для объемного разряда была получена экспериментально оценка ~ 1 GW/cm³. С учетом того, что в данных экспериментах энергия разряда выделяется в меньшем объеме (разряд цилиндрический), для сохранения полной энергии разряда удельная мощность должна составлять ~ 10 GW/cm³. Как показали расчеты в рамках одножидкостной двухтемпературной модели [8], для указанных параметров в области с $r < r_1$ формируется сходящаяся к оси ударная волна. При этом наибольшее сжатие и наибольший рост температуры имеют место на оси симметрии цилиндрического разряда. Фаза наибольшего сжатия приводится на рис. 3, причем данное состояние сохраняется в течение промежутка времени 30–33 ns. Из рисунка видно, что температура ионов в центре составляет ~ 100 eV, а концентрация увеличилась более чем в 10 раз. В этом случае из термализованной плазмы в области компрессии, по оценкам в результате $d(d, n)^3\text{He}$ реакции, возможен выход свыше 100 нейтронов за импульс. По порядку эта величина (с учетом эффективности регистрации) совпадает с количеством зарегистрированных нейтронов при использовании не дейтерированного катода.

Следует отметить, что использование анода не цилиндрической геометрии (острие, нож, пика, ...) приводит не только к полной потере

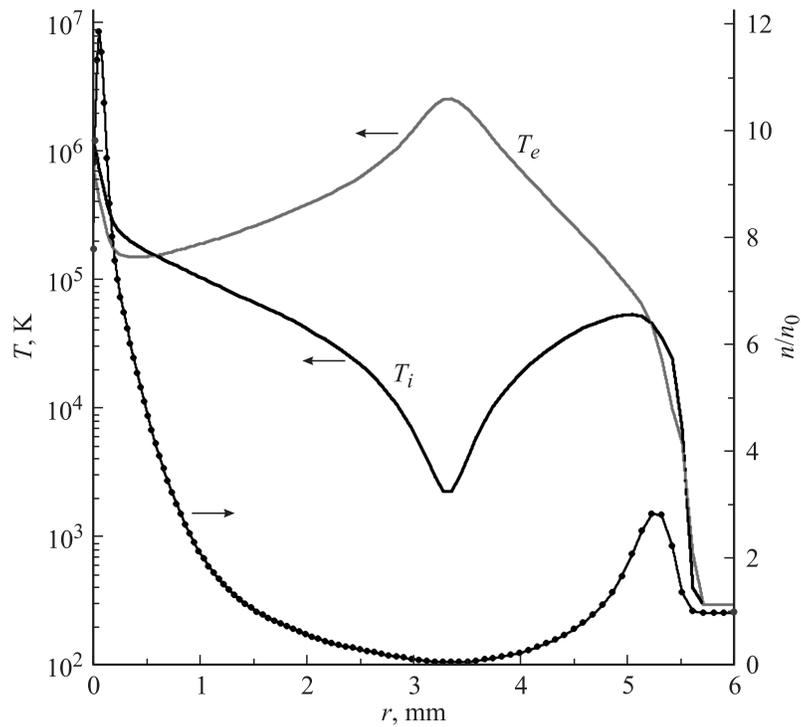


Рис. 3. Радиальные распределения концентрации газа n/n_0 ($n_0 = 3.3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ — начальная концентрация), температур электронов T_e и ионов T_i в момент времени 160 ns после начала пробоя.

стабильности разряда, но и к резкому снижению (или прекращению) выхода нейтронов в экспериментах как с дейтерированным катодом, так и с недейтерированным. При разряде в воздухе, а также при использовании электродов-мишеней в качестве анода генерация нейтронов не наблюдалась.

Таким образом, в работе показано, что генерация нейтронов в исследуемом разряде возможна не только при взаимодействии ускоренных (в разрядном промежутке) ионов дейтерия с мишенью-катодом, но и в области схлопывания цилиндрической ударной волны. Указанные процессы эмиссии нейтронов разделены во времени. Установлено,

что оптимальной для генерации нейтронов является цилиндрическая геометрия анода. Максимальный выход нейтронов при использовании катодов, обогащенных дейтерием, составил ~ 2200 нейтронов за импульс, что двукратно превышает ранее полученный в работе [2] результат.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“, ГК № 02.740.11.0562.

Список литературы

- [1] *Macchi A.* // Appl. Phys. B. 2006. V. 82. P. 337–240.
- [2] *Бабич Л.П., Лойко Т.В.* // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 4. С. 846–849.
- [3] *Babich L.P.* High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: ISTC Science and Technology Series. V. 2. Futurepast: Arlington, VA, 2003. 358 p.
- [4] *Беляев В.С., Виноградов В.И., Курилов А.С.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 125. В. 6. С. 1295–1301.
- [5] *Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х., Бураченко А.Г.* и др. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 2. С. 51–59.
- [6] *Boreiko V.F., Bystritsky V.M., Grebenyuk V.M.* et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A. 2002. V 490. P. 344–355.
- [7] *Дудкин Г.Н., Каминский В.Л., Нечаев Б.А.* и др. // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 10/2. С. 38–44.
- [8] *Имшенник В.С., Боброва Н.А.* Динамика столкновительной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1997. 320 с.