На правах рукописи

рыжков ВАЛЕНТИН ИВАНОВИЧ

ГЕНЕРАЦИЯ КОРОТКИХ НЕЙТРОННЫХ ИМПУЛЬСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВАКУУМНЫХ НЕЙТРОННЫХ ТРУБОК

Специальности: 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

> Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Автор Эру-

Москва - 2012

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор А.Е. Шиканов (НИЯУ МИФИ) доктор физико-математических наук, профессор А.С. Цыбин (НИЯУ МИФИ)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Ю.А. Свистунов (главный специалист по направлению НИИЭФА им. Д.В. Ефремова) кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник И.В. Визгалов (доцент НИЯУ МИФИ)

Ведущая организация: Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

Защита состоится «____» ____ 2012 г. в часов на заседании диссертационного совета Д 212.130.01 при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел. (499) 323-95-26, (499) 324-84-98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Автореферат разослан «____» ____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

(hepms

И.С. Щедрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. В настоящее время в прикладной ядерной физике можно выделить ряд важных направлений, где требуются излучатели нейтронных импульсов малой длительности на базе малогабаритных ускорителей нуклидов водорода:

- обнаружение взрывчатых веществ (ВВ), наркотиков и делящихся материалов (ДМ);

- исследования по термоядерному синтезу с инерциальным удержанием;

 нейтронная радиография быстропротекающих процессов на базе портативного оборудования;

- времяпролетная спектрометрия нейтронов при элементном анализе;

- тестирование детекторов импульсного нейтронного излучения.

Разработка и создание малогабаритных нейтронных генераторов исторически связано с разработкой атомного оружия, а впоследствии с разработкой методов нейтронного каротажа с целью разведки полезных ископаемых и контроля процесса их добычи. Традиционные и широко применяемые в настоящее время импульсных нейтронных генераторов (ИНГ) на базе малогабаритных вакуумных нейтронных трубок (BHT), позволяют генерировать нейтронные импульсы с длительностью в несколько микросекунд. Возможности нейтронных методов и области их применения значительно возрастают, с учетом сформулированных выше потребностей, при сокращении длительности нейтронных импульсов до нескольких десятков наносекунд и менее. Реализация наносекундных режимов генерации нейтронов связана с необходимостью формирования чрезвычайно коротких пакетов ускоренных дейтронов, бомбардирующих мишень ВНТ. Исследование процессов генерации коротких нейтронных импульсов с помощью ВНТ и разработка соответствующих технических решений, направленных на создание ИНГ с улучшенными временными характеристиками, представляет собой сложную, требующую эффективного решения задачу. Это определяет актуальность диссертации.

Цель исследований – изучение физических процессов, протекающих в устройствах для генерации нейтронных импульсов малой длительности ~ (1÷100) нс с использованием ВНТ и разработка эффективных технических решений для реализации таких устройств.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

1. Проведен компьютерный эксперимент по формированию дейтронных пакетов и генерации нейтронных импульсов с длительностью, меньшей времени пролета дейтрона в диодной системе ВНТ, с использованием модифицированных под эту задачу программы и алгоритма, реализующих метод «крупных частиц». Установлено, что на формирование и ускорение дейтронного потока существенное влияние оказывает собственное кулоновское поле дейтронов, соизмеримое с внешним ускоряющим полем, осуществляющее торможение дейтронов в области анода, расплывание потока дейтронов в поперечном направлении и его энергетического спектра. Показано слабое влияние кулоновского поля эмиссионных электронов на процесс ускорения дейтронов и генерацию нейтронов.

2. Предложены три модели формирования импульсных дейтронных потоков в диодных системах малогабаритных ВНТ, одна из которых для ее упрощения использует представление об эквивалентной динамической проводимости диодной системы. На их основе проведено компьютерное моделирование процессов формирования дейтронных пакетов и генерации нейтронов в ВНТ при длительности нейтронной вспышки ≤ 300 нс, но существенно превышающей время пролета дейтрона в диодной системе. Для этих режимов установлено, что с ростом электронной эмиссии с катода уменьшаются нейтронный выход и длительность нейтронного импульса.

3. Предложены две схемы генерации коротких нейтронных импульсов в ВНТ с применением генераторов импульсных напряжений (ГИН) на базе высоковольтного импульсного трансформатора (ИТ) с разрядником-обострителем и ГИН Аркадьева – Маркса. Проведено их экспериментальное исследование. На реакции T(d, n)⁴Не в первом случае был получен нейтронный выход 10⁶ н/имп при длительности ~ 40 нс, во втором $2 \cdot 10^7$ н/имп. при длительности ~ 100 нс.

4. Предложено техническое решение ВНТ с двумя мишенями на базе ионного триода для повышения эффективности генерации коротких нейтронных импульсов.

5. Проведено экспериментальное исследование макетов генераторов коротких нейтронных импульсов с бериллиевой и дейтериевой мишенями на базе обращенного диода с коллективным ускорением дейтронов и линии Блюмляйна. В проведенных экспериментах нейтронный выход достигал 10⁶ н/имп. при длительности импульсов в несколько десятков наносекунд.

Научная и практическая значимость диссертации состоит в том, что получена важная информация о формировании коротких дейтронных пакетов в ВНТ, позволяющая рассчитывать основные параметры генераторов наносекундных нейтронных импульсов. Разработанные научно- технические основы создания таких ИНГ могут существенно сократить временные затраты на проектирование подобных приборов. Создание и производственное освоение генераторов указанного типа позволит:

- существенно повысить эффективность аппаратурнометодических комплексов для поиска и идентификации скрытых опасных предметов и веществ, нейтронного элементного анализа состава вещества;

- исследовать быстропротекающие с участием быстрых нейтронов физические процессы в ядерно-физических установках;

- исследовать быстропротекающие процессы радиографическими методами;

- обеспечить возможность тестирования измерительной аппаратуры, для определения характеристик коротких нейтронных импульсов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования действующих макетов генераторов коротких нейтронных импульсов на базе ВНТ и ГИН.

2. Математические модели процессов формирования импульсных дейтронных потоков и генерации нейтронов в диодных системах малогабаритных ВНТ.

3. Результаты компьютерного эксперимента по моделированию процессов формирования дейтронных пакетов и генерации нейтронов в ВНТ при длительностях нейтронных импульсов лежащих в пределах от 1 до 300 нс.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошей повторяемостью результатов выполненных экспериментальных исследований, совпадением результатов теории и эксперимента.

Личный вклад автора заключается в выработке целей и постановке задач исследований, проведении физического и компьютерно-

го моделирования изучаемых процессов с использованием экспериментального оборудования НИЯУ МИФИ и ВНИИА им. Н.Л. Духова, а также комплекса компьютерных программ, разработанных на кафедре ЭФУ НИЯУ МИФИ; интерпретации полученных результатов; адаптации указанного оборудования и программ под решаемые задачи; разработке и исследовании ряда технических решений по генерации коротких нейтронных импульсов в ВНТ.

Апробация результатов диссертации.

Основные положения диссертации докладывались на 5-й Международной конференции по нейтронной радиографии, г. Берлин, 1996 г.: Международной конференции «Ядерная энергия в центральной Европе», г. Портороз, Словения, 1999 г.; Межотраслевой научно- технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе», Москва, 2003 г.; Международной научно- технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе», Москва, 2004 г.; Международной конференции «Radiation Interaction with Material and its Use in Technologies 2006»; Международной конференции по электростатическим ускорителям и нанотехнологиям, г. Обнинск, 2010 г.; Научных сессиях НИЯУ МИФИ, г. Москва, 2010-2012 гг., 22 Международном совещании по ускорителям заряженных частиц. г. Алушта, 2011. Отдельные положения диссертации докладывались на научных семинарах НИЯУ МИФИ, ВНИИгеосистем, ОИЯИ, ИТЭФ, НТЦ «РАТЭК», НПП «ГЕРС».

Публикации.

По результатам диссертации опубликовано 17 печатных работ [1-7], [10-19], в том числе 7 статей в реферируемых журналах по списку ВАК [1-7], два патента РФ на изобретение [8-9].

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 120 страниц, 56 рисунков, 1 таблицу и состоит из введения, 4-х глав, заключения, приложения и библиографии, включающей 94 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость диссертации.

Глава 1 содержит два раздела.

В первом из них рассмотрены вопросы возможного применения ИНГ с длительностью нейтронного импульса ~ $(1\div100)$ нс. Такие генераторы необходимы для реализации ряда методик обнаружения и идентификации взрывчатых веществ, наркотиков и делящихся материалов (методики PFNA – Pulsed Fast Neutron Analysis, NRA – Neutron Resonance Attenuation, NES – Neutron Elastic Scattering и «нейтронной локации»).

В методе PFNA осуществляется анализ энергетических спектров γ-излучения неупругого рассеяния одновременно анализом потоков нейтронов, формируемых при неупругом рассеянии, с использованием методики времени пролета. Это позволяет существенно повысить надежность обнаружения опасных веществ за счет отсечки значительного количества фоновых γ-квантов и увеличения отношения сигнал-шум. По своим потенциальным возможностям метод PFNA считается одним из наиболее перспективных среди ядернофизических методов контроля объектов.

Комбинированная методика NRA (Neutron Resonance Attenuation) и NES (Neutron Elastic Scattering) основана на резонансном характере упругого рассеяния, идущего с образованием компаунд-ядра и радиационного захвата. Положение резонансов на энергетической шкале определяется типом ядра. Необходимым условием реализации этой методики является короткий (наносекундный) импульс нейтронов широкого спектра энергий (от 1 до 8 МэВ), дающий возможность применить методику времени пролета нейтрона для выделения резонансов при регистрации нейтронов.

В методе «нейтронной локации» осуществляется облучение объекта контроля моноэнергетическими нейтронами, генерируемыми ВНТ при трех и более точках пространственного расположения мишени ВНТ относительно облучаемого объекта. При этом осуществляется измерение времени между генерацией нейтронной вспышки и регистрацией γ-квантов неупругого рассеяния нейтронов. После этого по данным измерений определяются координаты нахождения взрывоопасного предмета путем решения соответствующей системы алгебраических уравнений.

Из анализа литеры следует, что для получения удовлетворительной статистики измерений при реализации указанных методик

средний нейтронный поток ИНГ должен удовлетворять условию $\geq 10^8$ н/с.

Другой аспект применения связан с возможностью повышения эффективности нейтронного элементного анализа вещества. При этом могут быть реализованы три методики: нейтронный активационный анализ по короткоживущим радионуклидам; нейтронный радиационный анализ по спектрам нейтронов неупругого рассеяния, коррелируемым с резонансными линиями этих реакций и получаемым времяпролетным методом, а также нейтронный радиационный анализ по энергетическим и временным спектрам излучения радиационного захвата. Во всех трех случаях минимизация длительности нейтронной вспышки приводит к увеличению отношения «сигнал – шум» на выходе системы регистрации.

В настоящее время продолжает вызывать интерес проблема осуществления управляемой термоядерной реакции при сверхбыстром нагревании конденсированного термоядерного горючего до очень высокой температуры и за короткие времена (~ 10⁻⁹ с). Для правильной интерпретации получаемых результатов необходима соответствующая аппаратура, позволяющая с заданной точностью регистрировать указанные нейтронные поля. Ее калибровка может осуществляться с применением ИНГ, формирующих нейтронные потоки с указанными выше параметрами.

И, наконец, следует отметить возможность исследования быстропротекающих процессов методами нейтронной радиографии. Нейтронные генераторы дают возможность изучать процессы с характерными временами ~ 10⁻⁸ с, что, примерно, на пять порядков меньше временного разрешения, достижимого при использовании ядерного реактора.

Во втором разделе обсуждаются пять схем реализации генераторов нейтронных импульсов с длительностью ~ (1÷100) нс на базе ВНТ.

Первая схема подразумевает формирование на диодном зазоре высоковольтного импульса с помощью ИТ или ГИН Аркадьева-Маркса, соединенных с ВНТ через разрядник-обостритель (главы 2, 3, 4 диссертации).

Вторая схема также предполагает использование ГИН, но без разрядника-обострителя. В этом случае геометрия диодной системы и параметры ускоряющего импульса подбираются таким образом, чтобы процесс полного извлечения дейтронов из плазмы ионного источника протекал в течение короткого времени, определяющего длительность нейтронного импульса. В таких устройствах можно осуществлять генерацию нейтронных импульсов длительностью ~ 100 нс (главы 2, 4 диссертации).

В третьей схеме генерация коротких нейтронных импульсов обеспечивается при формировании короткого импульса тока при расположении на трассе дейтронного пучка ВЧ-дефлектора с коллиматором и клистронного группирователя (глава 3 диссертации).

Четвертая схема использует эффект коллективного ускорения дейтронов коротким импульсом ускоренных электронов (глава 4 диссертации).

Пятая схема предполагает использование импульсной электродинамическую систему с плазменным фокусом.

В данной работе предполагается исследование процессов генерации коротких нейтронных вспышек по первым четырем схемам.

В главе 2 рассмотрены математические модели генерации коротких нейтронных импульсов в ВНТ в рамках квазистационарной теории биполярного вакуумного диода, справедливой, когда длительность импульса дейтронного тока τ значительно превышает время пролета дейтроном ускоряющего зазора τ_{np} , определяемого из уравнения:

$$\int_{0}^{\tau_{\rm up}} \left[\int_{0}^{t} U(s) ds \right] dt = \frac{d^2 M_d}{e} ,$$

где d – ширина ускоряющего зазора; U(t) – зависимость ускоряющего напряжения от времени. В этом случае τ может достигать значений ~ 100 нс.

При этих условиях на квазистационарном уровне еще работает модель токопрохождения через диод, определяемая теорией Богуславского – Чайлда – Ленгмюра (БЧЛ), так как на протяжении большей части времени работы диода ускоряющий промежуток полностью заполнен объемным зарядом.

В качестве примера на рис.1 представлен типичный схематический разрез ВНТ с вакуумно-дуговым источником дейтронов (ВДИД).



Рис. 1. Схематический разрез ВНТ с вакуумно-дуговым источником дейтронов: *1* - узел мишени; 2 – анод и катод ускоряющей системы; 3 – ВДИД; 4 – изоляторы

За процесс извлечения дейтронов из плазмы ВДИД отвечают два фактора: тепловое движение дейтронов и колебания Ленгмюра в области, прилегающей к плазменной границе. В процессе извлечения дейтронов из плазменного образования его граница перемещается. Кинематика такого перемещения определяется полем скоростей в продольной ударной волне, образуемой при срабатывании ВДИД, и уменьшением продольного размера плазменного облака в результате отбора дейтронов. Изменение во времени продольной координаты плазменного фронта можно описать следующим приближенным дифференциальным уравнением:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{V_d(z+h)}{b_0 + V_d t} - \frac{j(z,t)}{en(t)} \tag{1}$$

с начальным условием $z(0) = h_0$. Здесь e – элементарный электрический заряд, z – текущая продольная координата плазменного фронта, h_0 – расстояние от ионного источника до ускоряющего зазора, b_0 – размер плазменного образования на стадии закалки его ионизационного состояния, $n(t) = \frac{N_d}{\pi R_A^{-2}(b_0 + V_d t)}$ – текущая концентрация дейтронов и электронов в плазме, $j(z,t) = \min\{j_{\text{БЧЛ}}, j_9\}$, R_A – радиус анодного электрода, V_d – начальная скорость плазменного фронта,

$$j_{\text{БЧЛ}}(z,t,u) \approx \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{e}{M_d}} \frac{f(u)}{[h_0 + z - d]^2} U(t)^{3/2} -$$
плотность тока БЧЛ,

f(u) – фактор компенсации объемного заряда дейтронов электронами с катода, $u = \sqrt{m/M_d} (I_e/I_d)$ – относительный электронный ток, I_e , I_d – электронный и дейтронный токи в ускоряющем зазоре ВНТ

$$j_{\Im} \approx \frac{eN_d}{\pi R_{\rm A}^2 b_0} \left(1 + \frac{V_d t}{b_0}\right)^{-5/4} \left(0, 4\sqrt{\frac{2e\Theta_0}{M_d}} + \frac{V_d}{\pi}\right) \left[1 + \left(1 + \frac{V_d t}{b_0}\right)^{-1/12}\right] - \frac{1}{2}\left(1 + \frac{V_d t}{b_0}\right)^{-1/12}\right] - \frac{1}{2}\left(1 + \frac{V_d t}{b_0}\right)^{-1/12} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{V_d t}{b_0}\right)^{-$$

плотность эмиссионного тока с плазменной поверхности, θ_0 – начальная температура плазмы.

Анализ уравнения (1) на качественном уровне показывает, что сначала плазменная граница движется в направлении катода, а затем, по мере убывания концентрации дейтронов, она останавливается и начинает быстро перемещаться назад. Зависимость ускоряющего напряжения от времени можно получить при решении самосогласованной системы дифференциальных уравнений (СДУ), составленной по правилам Кирхгофа для эквивалентной электрической схемы ИНГ, на основе высоковольтного ИТ в сочетании с уравнением (1).

Для рассмотрения процессов формирования и ускорения дейтронных пакетов на качественном уровне можно использовать упрощенный алгоритм, путем введения эквивалентной динамической проводимости диода.

Для расчета зависимости U(t) для ИНГ с разрядникомобострителем, характеризуемым пробойным напряжением U_{np} , использовалась СДУ с начальным условием $U(0) = U_{np}$ также в сочетании с уравнением (1).

Мгновенный нейтронный поток ВНТ в полный телесный угол рассчитывался с помощью следующего интегрального выражения:

$$\Phi(t,u,s) = G(s)I_d(t,u) \int_{0}^{10^{-3}U(t,u)} \frac{\sigma(W)dW}{F(W,s)}, \qquad (2)$$

где

$$e G(s) = \frac{N_A}{e} \frac{s\rho(s)}{A + A_H s} = \frac{N_A}{e} \frac{s\rho_M}{A_M \chi(s)}, \quad N_A -$$
число Авогадро, $A -$

атомный номер элемента-носителя мишени, $A_{\rm H}$ – атомный номер изотопа водорода в мишени (дейтерий или тритий), $A_{\rm M}$ – атомный

номер металла-носителя мишени (T_i, S_c, Z_r), *s* – коэффициент стехиометрии в мишени по тяжелому водороду, $\rho(s)$ – плотность вещества мишени, $\rho_{\rm M}$ – плотность металла-носителя, *W* – кинетическая энергия ускоренного дейтрона, измеряемая в МэВ, $\chi(s) \approx 1+0,02s$ – коэффициент разбухания мишени при ее насыщении, $\sigma(W)$ – микросечение ядерной реакции, *F*(*W*,*s*) – энергетические потери дейтрона на единицу длины.

Для вычисления нейтронного выхода по формуле (2) необходимо знать зависимость от времени тока дейтронов и ускоряющего напряжения на диодном зазоре ВНТ. В общем случае ее можно найти путем решения соответствующей электродинамической СДУ, совместно с уравнением (1). На рис. 2 представлены зависимости мгновенного нейтронного потока $\Phi(t, u)$.



Рис. 2. Временные зависимости мгновенного нейтронного потока $\Phi(t, u)$ для различных значений относительного электронного тока u (реакция D(d, n)³He) (t, мкс)

Анализ приведенных зависимостей говорит о существенном влиянии эмиссионных электронов (параметр *u*) на процесс генерации нейтронов, при ограниченной энергии, запасаемой в накопительной емкости высоковольтной цепи ИНГ. Оно сводится к уменьшению амплитуды и длительности нейтронного импульса с ростом параметра *u*, определяющего количество эмиссионных электронов в диодной системе ВНТ.

Пересчет на реакцию $T(d, n)^4$ Не показал возможность генерации нейтронов на уровне $\geq 10^8$ н/имп при длительности импульса ~ 100 нс.

Другой вывод, который можно сделать на основе проведенного компьютерного эксперимента – это ограничение снизу на длительность нейтронного импульса, возникающее за счет конечного времени пролета плазмы внутри цилиндрического электрода, оцениваемое отношением $\frac{h_0}{V_d}$, которое для ВДИД не может быть сделано сколь угодно малым. Поэтому схема генерации наносекундных нейтронных импульсов в ВНТ на базе ВДИД без использования

нейтронных импульсов в ВНТ на базе ВДИД без использования разрядника-обострителя мало перспективна.

Характерные расчетные кривые $\Phi(t,u)$ для ИНГ с разрядникомобострителем ($U_{np} = 100$ кВ) представлены на рис. 3.



Рис. 3. Временные зависимости мгновенного нейтронного потока $\Phi(t, u)$ для различных значений относительного электронного тока (реакция D(d, n)³He) (*t*, c) (схема с разрядником-обострителем)

В главе 3 описана модель ускорения в диодной системе ВНТ дейтронных пакетов с длительностью меньшей или порядка τ_{np} , которое в данном случае можно оценить с помощью соотношения:

$$\tau_{\rm np} = \tau + \frac{1}{\int\limits_{0}^{\tau} U(t)dt} \left\{ \frac{M_d d^2}{e} - \int\limits_{0}^{\tau} \left[\int\limits_{0}^{s} U(t)dt \right] ds \right\}.$$

Соответствующие вычисления показывают, что в малогабаритных ВНТ пролетное время дейтрона может изменяться в пределах от 2 до 10 нс. В этом случае процесс формирования и ускорения дейтронных пакетов в принципе не может быть описан в рамках квазистационарной модели БЧЛ, так как большинство времени ускоряющий зазор диода оказывается не до конца заполненным объемным зарядом дейтронов.

Процесс численного моделирования осуществлялся путём приближенного решения на компьютере самосогласованным образом уравнения Пуассона для потенциала электрического поля φ в цилиндрической системе координат (r, z) и системы уравнений динамики:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}r\frac{d\varphi}{dr} + \frac{d^{2}\varphi}{dr^{2}} = -\frac{\rho(r,z)}{\varepsilon_{0}}, \qquad \begin{cases} \frac{d\mathbf{v}_{k\alpha}}{dt} = -\frac{q_{k\alpha}}{\mu_{k\alpha}}\nabla\varphi(\mathbf{r}_{k\alpha});\\\\ \frac{d\mathbf{r}_{k\alpha}}{dt} = \mathbf{v}_{k\alpha}, \end{cases}$$

где $\rho(r,z)$ – самосогласованная плотность заряда в ускоряющем зазоре диода, $q_{k\alpha}$, $\mu_{k\alpha}$, $\mathbf{r}_{k\alpha}$, $\mathbf{v}_{k\alpha}$ – заряд, масса, радиус вектор и скорость укрупненной частицы с номером $k\alpha$. Индекс k определяет состав крупной частицы (k = 1 – электроны, k = 2 – дейтроны).

В используемой вычислительной модели реальные частицы объединяются в укрупненные, число которых на много порядков ниже числа реальных частиц («метод крупных частиц»). Полевые величины, которые заполняют все пространство физической системы, приближенно представляются значениями в регулярно расположенных узлах сетки. Принятая модель является бесстолкновительной, в которой взаимодействия отдельных частиц, как такового, нет, а отдельные материальные точки размазываются в непрерывные образования. Дифференциальные операторы при этом заменяются конечноразностными аппроксимациями на сетке. Потенциалы в месте положения частицы вычисляются посредством интерполяции по массиву сеточных значений. Сеточные плотности рассчитываются с помощью обратной процедуры раздачи характеристик частицы в ближайшие узлы сетки.

Количество частиц N(t) с течением времени меняется вследствие поступления (эмиссии, инжекции) и ухода частиц через границы области.

В результате проведенного компьютерного эксперимента была установлена следующая картина заполнения диода дейтронами.

На первом этапе вылетевшие с анода дейтроны постепенно заполняют всё диодное пространство. Однако количество дейтронов на аноде постоянно растёт. Это объясняется тем фактом, что по мере заполнения диода, собственное кулоновское поле дейтронов, находящихся внутри диода, растет, причём на аноде появляется сильное продольное тормозящее дейтроны поле. По окончании поданного на диод импульса эмиссия прекращается, и оставшиеся дейтроны покидают диодное пространство. Кулоновское поле пучка в диоде на этом этапе постепенно убывает.

По мере движения к катоду однородность пучка нарушается, а радиус его растет, что объясняется влиянием собственного кулоновского поля. При этом часть дейтронов не достигают катода.

Собственное поле пучка оказывается по порядку величины сравнимым с внешним полем, что и приводит к его расплыванию в продольном и поперечном направлениях. Проводился также расчет зависимостей потока ускоренных дейтронов от тока эмиссии и ширины ускоряющего зазора, представленных на рис. 4.

На рис. 5 представлен энергетический спектр дейтронов на выходе.

По вертикальной оси на графиках отложен заряд дейтронов в кулонах, по горизонтальной – энергия в электрон-вольтах. Размывание спектра вызвано наличием собственного поля пучка. Полученные энергетические спектры позволили сделать расчет мгновенного нейтронного потока, по формуле:

$$\Phi = \frac{sn_{\mathfrak{A}}}{e\tau} \sum_{i} q_{i} \int_{0}^{W_{i}} \frac{\sigma(W)}{F(W)} dW,$$

где $n_{\rm R}$ – концентрация ядер металла-носителя мишени, q_i – заряд группы дейтронов, соответствующий энергии W_i (МэВ). Расчет проводился для титановой мишени (s = 1), напряжения 100 кВ и длительности импульса 10 нс. На рис. 6 представлены зависимости нейтронного потока от эмиссионного тока дейтронов и длительности импульса тока инжекции дейтронов при постоянном напряжении (100 кВ) на ускоряющем зазоре.

Deuteron flow



Рис. 4. Характерные зависимости потока дейтронов от эмиссионного тока источника дейтронов, рассчитанные для фиксированной амплитуды напряжения на ускоряющем зазоре. Длина диодного промежутка равна 0,01 м (нижняя кривая) 0,0075 (средняя кривая) и 0,005 м (верхняя кривая)

Расчет показал, что значение максимального полного мгновенного потока нейтронов может превышать величину ~10¹¹ н/с. Из этих кривых видно проявление эффекта запирания при различных длительностях импульса ускоряющего напряжения. Начиная с тока 10А, при длительностях, больших 20 наносекунд, происходит запирание диода объемным зарядом. При больших токах запирание происходит раньше.

16



Рис. 5. Энергетический спектр ускоренных дейтронов на мишени: левый график соответствует эмиссионному току дейтронов 1 А, правый – току 15 А



Отдельно исследовались зависимости нейтронного потока от ускоряющего напряжения. При этом был установлены монотонный рост нейтронного потока с ростом напряжения и практически отсутствие влияния эмиссионных электронов на процесс генерации нейтронов.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментального исследования трех схем генерации коротких нейтронных импульсов в ВНТ.

Первая из рассматриваемых схем генерации нейтронов использовала высоковольтный импульсный трансформатор в сочетании с разрядником-обострителем, включенным последовательно с ВНТ. Схема действующего экспериментального макета исследуемого излучателя коротких нейтронных вспышек на ВНТ с ВДИД представлена на рис. 7.



Рис. 7. Принципиальная электрическая схема экспериментального излучателя нейтронных импульсов наносекундного диапазона

Экспериментальный излучатель включал в себя: высоковольтный ИТ – Т₁, формирователь импульсов ускоряющего напряжения, ВНТ и схему запуска ионного источника. Все эти узлы размещались в цилиндрическом корпусе с размерами Ø110×500 мм. Изолятором служило трансформаторное масло. Коаксиальное расположение элементов и отсутствие соединительных проводников (все контакты осуществлялись рабочими поверхностями) обеспечивало минимальные величины паразитных элементов. Общий вид излучателя представлен на рис. 8.



Рис. 8. Общий вид действующего макета малогабаритного генератора коротких нейтронных импульсов

Величины емкостей C_2 и C_3 в цепи разрядника-обострителя K_2 выбирались в пределах 50÷100 пФ, индуктивность L_2 – в пределах 0,5÷2 мкГ, а сопротивление R_2 – в пределах 300÷2000 Ом. В качестве обострителя использовался разрядник высокого давления с напряжением срабатывания 40÷60 кВ, временем коммутации t_{κ} = 3 нс, коммутируемой энергией 0,5 Дж и рабочей частотой 100 Гц.

Формирование коротких нейтронных импульсов происходит следующим образом. Конденсаторы C₁ и C₄ заряжается постоянным напряжением U₀. При подаче управляющего импульса на электрод поджига коммутатора K_1 последний срабатывает и конденсатор C_1 разряжается на первичную обмотку трансформатора T₁. На его вторичной обмотке формируется импульс высокого напряжения, который подается на схему формирования наносекундного импульса напряжения, включающую разрядник-обостритель К2. Сформированный высоковольтный импульс подается на ускоряющий зазор. Одновременно в цепи ВДИД (L_2, L_3, C_5, T_2) на электроде П формируется импульс поджига, запускающий ионный источник. При этом конденсатор C_4 разряжается через промежуток анод (A) – катод (K) ВДИД ВНТ. В плазме дугового разряда образуются дейтроны, которые ускоряются коротким высоковольтным импульсом напряжения к мишени (М). Генерация нейтронов осуществлялась на тритиевой мишени по ядерной реакции T(d, n)⁴He. На рис. 9 представлены экспериментальные осциллограммы.

Нейтронные измерения осуществлялись методом протонов отдачи, образующихся в сцинтилляторе. Длительность нейтронного импульса составляла примерно 40 нс на полувысоте. Нейтронный выход составил величину $N \sim 1 \cdot 10^6$ н/имп. при зарядном напряжении $U_0 = 5$ кВ и емкости накопительного конденсатора $C_1 = 0,1$ мкФ. Полученные данные совпадают с результатами компьютерного моделирования (см. рис. 3).



Рис.9. Осциллограммы импульсов напряжения на емкости C2, поджигающем электроде, тока через ВДИД, и ускоряющего напряжения и нейтронного импульса

Вторая рассмотренная схема генерации коротких нейтронных импульсов основана на возможности быстрого извлечения всех дейтронов из лазерной плазмы при подаче на ускоряющий зазор ВНТ с лазерным источником дейтронов (ЛИД) импульса напряжения с большой амплитудой (≥ 300 кВ).

Такая схема генерации нейтронов может быть реализована в излучателе нейтронов, сочетающем ВНТ с ЛИД и ГИН Аркадьева-Маркса, позволяющего получать импульсы высокого напряжения до 500 кВ, при сравнительно малых габаритах устройства (радиальный размер до 0,15 м) при запасенной энергии до 1 Дж.

Рассматриваемая схема генерации коротких нейтронных импульсов отличается от предыдущей тем, что в ней укорочение нейтронного импульса достигается быстрым извлечением дейтронов из плазмы за счет большого значения тока БЧЛ без использования разрядника-обострителя.

При проведении нейтронных измерений использовался сцинтилляционный детектор. Выход нейтронов на среднем уровне достигал $\approx 2 \cdot 10^7$ н/имп. при средней длительности импульса на полувысоте около 100 нс. Амплитуда ускоряющего импульса при этом не превышала 300 кВ, а длительность на полувысоте колебалась в пределах (150-180) нс.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что при увеличении амплитуды ускоряющего импульса, жесткой синхронизации пуска лазера с поджигом ГИН и повышения стабильности последнего в частотном режиме, возможна реализация эксплуатационного прибора со средним нейтронным потоком в полный телесный угол ~ 10⁹ н/с и длительностью импульса на полувысоте не более 100 нс.

В описанных выше экспериментах по генерации коротких нейтронных импульсов показана необходимость более эффективного подавления электронов, эмитируемых нейтронообразующей мишенью для повышения ускоряющего напряжения и ионного тока. Здесь весьма перспективно использовать идею магнитной изоляции ускоряющего зазора трубки полем спиральной линии. Эксперименты, проведенные с подобными диодными системами на разборном макете ВНТ, показали возможность генерации до 10⁸ нейтронов в импульсе на реакции D(d, n)³He.

Получение коротких нейтронных импульсов возможно при использовании обращенных диодов с коллективным ускорением дейтронов. В этом устройстве потоки дейтронов получаются при их ускорении в трубке дрейфа сильноточным потоком электронов. Условием реализации такого ускорения является запирание электронного потока в трубке дрейфа собственным объемным зарядом, сопровождаемое образованием виртуального катода и продольной потенциальной ямы, в которую захватываются дейтроны. Для этого необходимо, чтобы электронный ток превысил некоторое критическое значение, определяемое отношением радиусов электронного пучка и трубки дрейфа, а также энергией электронов. После захвата определенного количества дейтронов ионизованных электронным потоком заряд электронов компенсируется и яма приходит в движение, ускоряя захваченные дейтроны в продольном направлении.

В проведенных экспериментах использовались мишени из дейтерированного полиэтилена и бериллия. При этом на дейтериевой мишени был получен нейтронный выход 10^6 н/имп., а на бериллиевой 10^5 н/имп. при длительности нейтронного импульса от 10 до 50 нс. Анализ данных измерений позволил получить эмпирические зависимости нейтронного выхода в импульсе от напряжения U_0 на электронном диоде:

$$N_{\rm CD_2}(U_0) \approx 995 \exp(0.041U_0), \quad N_{\rm Be}(U_0) \approx 155 \exp(0.05U_0)$$

На их основе можно прогнозировать увеличение нейтронного выхода с ростом U_0 . Так при увеличении амплитуды напряжения до значения $U_0 = 300$ кВ, можно ожидать получения выхода на уровне ~ 10^8 н/имп.

Полученные данные измерений нейтронного выхода в трех рассмотренных экспериментальных ИНГ говорят о том, что даже на рассмотренном уровне исследованные схемы генерации нейтронов удовлетворяют требованиям к среднему нейтронному потоку и длительности импульса, предъявляемым описанными выше областями применения.

Укорочение нейтронного импульса и уменьшение его амплитуды приводит к уменьшению среднего нейтронного потока. Одно из возможных технических решений для компенсации этих эффектов описано в приложении. Оно реализует ВНТ с двумя мишенями и внутренним прозрачным анодом, работающей по схеме ионного триода.

Геометрия ВНТ такова, что электронный компонент не участвует в замыкании электрической цепи, состоящей из генератора импульсного высокого напряжения и двух соединенных параллельно ускоряющих зазоров, в которых электронные токи протекают в противоположенных направлениях и взаимно компенсируют друг друга. Объемный заряд электронов частично компенсируют друг друга. Объемный заряд электронов частично компенсирует объемный заряд дейтронов. По сравнению с обычным биполярным диодом эта компенсация является двукратной, так как электронная плотность в данном случае превышает плотность электронов в обычном биполярном диоде в два раза. Это обеспечивает значительное увеличение первеанса диодных зазоров, по сравнению с диодным зазором прототипа, а, следовательно, и излучаемого нейтронного потока.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертации.

1. На основе изучения литературных источников и патентной информации проведен анализ возможных методов формирования

нейтронных импульсов с длительностью ~ $(1\div100)$ нс в ИНГ на базе ВНТ. На основании проведенного анализа показано, что наиболее перспективными способами генерации импульсно- периодических нейтронных полей с такой временной структурой являются:

- формирование на диодном зазоре высоковольтного импульса с помощью ГИН, соединенного с ВНТ через разрядник-обостритель;

- формирование на диодном зазоре импульса большой амплитуды (≥ 300 кВ) с помощью ГИН для обеспечения полного извлечения дейтронов из плазмы ионного источника в течение короткого времени (~ 100 нс);

- формирование пакета дейтронов малой длительности путем последовательного расположения на трассе дейтронного пучка ВЧдефлектора, коллиматора и клистронного группирователя;

- использование эффекта коллективного ускорения дейтронов коротким импульсом релятивистских электронов (схема обращенного диода).

2. Рассмотрены две схемы генерации коротких нейтронных импульсов в ВНТ с ГИН на базе высоковольтного импульсного трансформатора с разрядником-обострителем и ГИН Аркадьева-Маркса, выполнен расчет и оптимизация их электрических параметров. Проведено их экспериментальное исследование. На реакции $T(d, n)^4$ Не в первом случае был получен нейтронный выход 10^6 н/имп. при длительности 40 нс, во втором $2 \cdot 10^7$ н/имп. при длительности 100 нс.

Для уменьшения энергопотребления этих схем проведено экспериментальное исследование макета ИНГ, в котором используется система подавления электронной эмиссии с катода импульсным магнитным полем конусообразной спиральной линии, установлены ее оптимальные геометрические параметры.

3. Проведен компьютерный эксперимент по генерации коротких нейтронных импульсов с длительностью, меньшей или соизмеримой с пролетным временем дейтрона, в результате которого установлено, что на формирование и ускорение дейтронного потока существенное влияние оказывает собственное кулоновское поле дейтронов, соизмеримое с внешним ускоряющим полем, осуществляющее торможение дейтронов в области анода, расплывание потока дейтронов в поперечном направлении и его энергетического спектра.

4. Предложены модели процессов формирования коротких нейтронных импульсов с длительностью, превышающей пролетное время дейтрона (квазистационарный случай), в ИНГ с разрядником-обострителем и без него. Для упрощенной модели процесса генерации нейтронов использовано об эквивалентном динамическом сопротивлении диодной системы. Проведено компьютерное моделирование процессов формирования дейтронных пакетов и генерации нейтронов в ВНТ при длительности нейтронной вспышки ≤ 300 нс, но существенно превышающей время пролета дейтрона в диодной системе. Для этих режимов установлена существенная роль возможной электронной эмиссии с катода (мишени) ВНТ на формирование нейтронного импульса – уменьшение нейтронного выхода и длительности импульса.

5. Предложено оригинальное техническое решение ВНТ с двумя нейтронообразующими мишенями на базе ионного триода для повышения эффективности генерации коротких нейтронных импульсов.

6. Проведено экспериментальное исследование макетов генераторов наносекундных нейтронных импульсов с использованием бериллиевой, углеродной и дейтериевой мишеней на базе обращенного диода с коллективным ускорением дейтронов. В экспериментах нейтронный выход достигал 10⁶ н/имп. при длительности в несколько десятков наносекунд.

7. Полученные данные измерений нейтронного выхода в трех экспериментальных ИНГ говорят о том, что даже на рассмотренном уровне исследованные схемы генерации нейтронов в принципе удовлетворяют требованиям по среднему нейтронному потоку и длительностям импульса, предъявляемым описанными выше методиками дистанционного обнаружения и идентификации скрытых опасных предметов.

Список литературы

1. Боголюбов Е.П., Рыжков В.И. Портативные генераторы нейтронов Всероссийского НИИ автоматики (ВНИИА) для физических исследований // ПТЭ. 2004. № 2. С.160-163.

2. Application of neutron generators for high explosives, toxic agents and fissile material detection / V.I. Mikerov, Ju.N. Barmakov, V.I. Ryzhkov et. al. // Applied Radiation and Isotopes. 2004. 61. P.537-543.

3. Особенности извлечения водородных ионов из импульсных плазменных образований / А.Н. Диденко, В.И. Ращиков, В.И. Рыжков, А.Е. Шиканов // Письма в ЖТФ. 2011. Т.37. Вып. 21. С.70-75.

4. Характеристики излучения портативных импульсных нейтронных генераторов / В.Л. Ромаданов, В.К. Сахаров, Д.Н. Черникова, В.И. Рыжков, Т.О. Хасаев, А.А. Сладков // Атомная энергия. 2011. Т.111. Вып.1. С.33-37.

5. Компьютерное моделирование процессов генерации наносекундных нейтронных импульсов в вакуумных ускорительных трубках / А.Н. Диденко, В.И. Ращиков, В.И. Рыжков, А.С. Цыбин, А.Е. Шиканов // Атомная энергия. 2012. Т.112. Вып.3. С.189-191.

6. Генерация коротких нейтронных импульсов в вакуумных ускорительных трубках с использованием высоковольтных генераторов импульсных напряжений / К.И. Козловский, В.И. Рыжков, Д.Р. Хасая, А.С. Цыбин, А.Е. Шиканов // Доклады АН ВШ РФ. 2012. №1(18). С.98-104.

7. Экспериментальное исследование макета малогабаритного генератора нейтронов с импульсной магнитной изоляцией / К.И. Козловский, Д.Д. Пономарев, В.И. Рыжков, А.С. Цыбин, А.Е. Шиканов // Атомная энергия. 2012. Т.112. Вып.3. С.182-184.

8. Схема импульсного нейтронного генератора / Е.П. Боголюбов, А.А. Битулев, И.Г. Курдюмов, Ю.П. Кузнецов, В.И. Рыжков, Д.В. Тювакин, Н.В. Шахорин // Патент РФ №2364965 от 19.11.2007.

9. Схема импульсного нейтронного генератора / Е.П. Боголюбов, И.Г. Курдюмов, Ю.П. Кузнецов, А.А. Битулев, В.И. Рыжков, Д.В. Тювакин, Н.В. Шахорин // Патент РФ №2368024 от 19.11.2007.

10. Нейтронные генераторы на вакуумных нейтронных трубках для активационного анализа и физических исследований / Е.П. Бо-голюбов, В.И. Рыжков, И.Г. Курдюмов, Ю.П. Кузнецов, В.Т. Бобылев, В.А. Самарин // Сб. материалов Межотраслевой научно-технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе». М.: ВНИИА им. Н.Л. Духова, 2003. С.61-65.

11. Нейтронные генераторы на вакуумных нейтронных трубках для аппаратуры геофизических исследований скважин / Е.П. Боголюбов, В.И. Рыжков, И.Г. Курдюмов, Ю.П. Кузнецов, Ю.К. Пресняков, Ю.Г. Бессарабский, А.А. Битулев // Там же. С.298-302.

12. Исследование параметров установки для идентификации взрывчатых и наркотических веществ на основе портативного нейтронного генератора / Е.П. Боголюбов, Ю.К. Пресняков, В.И. Рыжков, Т.О. Хасаев, В.М. Быстрицкий, Н.В. Власов, В.Г. Кады-

шевский, А.П. Кобзев, В.А. Никитин, Ю.Н. Рогов, М.Г. Сапожни-ков, А.Н. Сисакян, В.М. Слепнев, В.А. Уткин // Там же. С.263-268.

13. Импульсные нейтронные генераторы ВНИИА на основе камер плазменного фокуса / Е.П. Боголюбов, С.И. Брагин, Ю.П. Иванов, Ю.П. Кузнецов, Б.Д. Лемешко, В.И. Рыжков, В.А. Самарин, П.П. Сидоров // Там же. С.77-81.

14. Импульсные нейтронные генераторы на вакуумных нейтронных трубках / Ю.Г. Бессарабский, А.А. Битулев, В.Т. Бобылев, Е.П. Боголюбов, Ю.П. Кузнецов, И.Г. Курдюмов, Ю.К. Пресняков, В.И. Рыжков, В.А. Самарин // Сб. материалов Международной научнотехнической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе». М.: ВНИИА им. Н.Л. Духова, 2005. С.72-83.

15. Импульсные нейтронные генераторы ВНИИА на основе камер плазменного фокуса с генератором газа / Е.П. Боголюбов, С.И. Брагин, Ю.П. Иванов, Ю.П. Кузнецов, Б.Д. Лемешко, В.И. Рыжков, В.А. Самарин, П.П. Сидоров // Там же. С.95-98.

16. Генерация наносекундных нейтронных импульсов в диодных вакуумных ускорительных трубках / А.Н. Диденко, В.И. Ращиков, В.И. Рыжков, А.Е. Шиканов // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерное приборостроение». 2011. Вып. 1(28). С.17-25.

17. Вопросы повышения эффективности малогабаритных вакуумно-дуговых источников дейтронов для импульсных нейтронных генераторов / А.Н.Д иденко, Э.С. Масунов, А.С. Пластун, С.М. Полозов, В.Л. Шатохин, А.Е. Шиканов, Ю.Н. Бармаков, Е.П. Боголюбов, В.И. Рыжков, Н.Н. Щитов // Там же. С. 5-16.

18. Компьютерное моделирование генерации коротких нейтронных импульсов в вакуумной ускорительной трубке / А.Н. Диденко, В.И. Ращиков, В.И. Рыжков, А.Е. Шиканов // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011. Аннотации докладов. Т.2. Фундаментальные проблемы науки. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. С.136.

19. Рыжков В.И. Генерация наносекундных нейтронных импульсов в вакуумных ускорительных трубках (теория и эксперимент) // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012. Аннотации докладов. Т.2. Фундаментальные проблемы науки. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. С.184.

Подписано в печать 23.05.2012. Формат 60х84 1/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № Отпечатано в типографии НИЯУ МИФИ. 115409, Москва, Каширское ш., 31