

ПЛАЗМЕННЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР НА ПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНИ ДЛЯ АКТИВАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. В. Раденко^{1,*}, *М. В. Долгополов*^{2,**}, *А. С. Чипура*^{2,***},
А. В. Раденко^{1,****}, *В. Б. Свирков*^{1,*****},
А. И. Сомов^{3,*****}

¹ ТП «АиСТ» и НПК «Новая Энергия», Самара, Россия

² Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

³ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

Кратко рассмотрены схема плазменного нейтронного генератора на плазменной мишени, теоретические и прикладные аспекты моделирования магнетогидродинамического течения управляемой плазмы, обоснование дискретизации потоков конденсированной плазмы и ионов на основе введения понятия дискретности потоков на базе разработок методики и технологии создания и формирования электронно-управляемых потоков ионов и плазмы в магнитных полях путем группировки потоков в определенных последовательностях. Работа разрабатываемых установок основана на физических принципах дискретного уплотнения плазменных и ионных потоков путем изменения управляющих параметров магнитооптических систем. Проведены предварительные эксперименты на установке с плазменным электрогенератором для облучения полупроводниковых гетероструктур с целью создания радиационно-индуцированных дефектов.

The scheme of a plasma neutron generator on a plasma target, theoretical and applied aspects of modeling the magnetohydrodynamic flow of controlled plasma, substantiation of the discretization of condensed plasma and ion fluxes based on the introduction of the concept of flow discreteness based on the development of methods and technology for creating and forming electronically controlled ion and plasma fluxes in magnetic fields by grouping fluxes in certain sequences are briefly considered. The operation of the developed installations is based on the physical principles of discrete compaction of plasma and ion flows by changing the control parameters of magneto-optical systems. Preliminary experiments have been carried

* E-mail: quasar_ltd@mail.ru

** E-mail: mvdolg@yandex.ru

*** E-mail: al_five@mail.ru

**** E-mail: avradenko@ya.ru

***** E-mail: tp-aist@mail.ru

***** E-mail: artem.somov.2002@mail.ru

out on an installation with a plasma electric generator for irradiating semiconductor heterostructures in order to create radiation-induced defects.

PACS: 52.30.-q; 84.30.Ng

ВВЕДЕНИЕ

Трудности и время изготовления ядерных реакторов как источников электрической и тепловой энергии, а также источников нейтронов различной интенсивности приводят к необходимости создания альтернативных компактных устройств в качестве электрических и нейтронных генераторов. Но такие компактные генераторы могут применяться в гораздо более широких областях: обнаружение скрытых ядерных материалов [1], производство изотопов [2–4], нейтронная терапия [5–7], нейтронное трансмутационное легирование [8] и другие приложения [9, 10]. Наиболее распространенными реакциями в генераторах нейтронов являются реакции синтеза дейтерий–дейтерий (D–D) и дейтерий–третий (D–T). В настоящее время существуют и появляются новые модификации генераторов, использующих различные [11–13] реакции синтеза и конструкции.

Современные генераторы нейтронов, основанные на трубках (ГОСТ 21171-80), классифицируются по типу потока (постоянный поток, модулированный поток, импульсный поток) [14, 28].

Мы сосредоточимся на электронно-управляемом плазменном нейтронном генераторе на «твердой» (большой концентрации) плазменной мишени, основанном на реакциях ядерного синтеза различных легких ядер в плазменных потоках [14–19]. Реакции синтеза с участием легких ядер H, D, T, ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ наиболее предпочтительны для плазменного генератора в качестве источников нейтронов.

Результирующий выход первичных нейтронов может быть эффективно увеличен в плазме, поддерживаемой при относительно низкой температуре, по сравнению с «чистыми» термоядерными реакторами [17]. Эта задача может быть выполнена только с помощью пучков, свойства которых тщательно настроены для заданных параметров плазменной мишени, при этом время термализации быстрых ионов вдоль направления магнитных линий выражается классическими решениями [20].

В отличие от работы [21] в предлагаемой схеме нейтронного генератора используется синтез на плазменной мишени большой концентрации. В работе [21] используется газовая мишень — газовая трубка, которая является источником нейтронов. В нашем случае применяется плазменная мишень в магнитной ловушке. Так как возможно получать различные концентрации плазменной мишени от 10^{18} до 10^{22} см $^{-3}$, то будут получены различные концентрации потока нейтронов. Также возможно регулировать поток налетающих на мишень дейтронов, используя управляемую

магнитную ловушку, обеспечивая требуемую концентрацию нейтронного потока на выходе.

В качестве возможного приложения мы рассматриваем активацию полупроводниковых материалов [10, 18, 22]. В [23] были даны рекомендации по реализации технологического процесса создания сложных гетероструктур различного назначения в части формирования, влияния и эволюции дефектов в материалах с радиоизотопным источником энергии, содержащим монокристаллическую фазу полупроводниковой структуры карбида кремния в виде пленки, имеющей проводимость n - или p -типа для разделения электронно-дырочных пар, включающей атомы углерода-14 в молекулярной структуре карбида кремния. Примесные атомы и вакансии можно рассматривать как основные дефекты, которые проявляются при имплантации и определяют формирование свойств гетероструктуры карбида кремния. Следует отметить, что неупорядоченные структуры могут быть описаны только с помощью ограниченного числа подходов. В DFT есть несколько решений для этого [24], и эта тема требует дальнейшего развития для объяснения режима, включая точечные дефекты, вызванные излучением.

В работах [18, 25, 26] была предложена камера магнитооптического синтеза, в частности, с целями синтеза углерода-14. Установка осуществляет электронное управление ионными источниками и магнитооптической концентрацией потока с энергией ионов до 50 кэВ, секциями импульсного ускорителя с электронным управлением, которые обеспечивают дискретный поток ионов с энергией ионов от 100 до 600 кэВ в зависимости от компонентов смеси, с управляемой магнитодинамической ловушкой для генерации плотных потоков нейтронов. Синтез углерода-14 нейтронами происходит в магнитооптической камере на плотной ионно-плазменной мишени. На заключительном этапе радионуклиды из магнитооптического накопителя осаждаются на подложку с предварительно сформированными гетеропереходами SiC/Si [22]. Также возможно многослойное формирование и индуцированная активация на подложках из SiC, Si или на подложках, изготовленных из других материалов, с возможностью эксплуатации и наработки других радионуклидов, в том числе никеля-63.

Технология ионно-плазменных генераторов с электронным управлением основана на методе получения управляемых дискретных потоков ионов или плазмы. Термин синтез-генератор был введен авторами для краткости обозначения устройства, работающего на основе управления ионным многофазным потоком в электрическом плазменном генераторе ядерного синтеза [19, 26]. Метод дискретных потоков или плазменных дискретов был предложен и описан в работе [27].

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЕННОГО НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Конструкция современных генераторов нейтронов варьируется в зависимости от ионных источников (плазменные, газоразрядные) и схемы ускорения. Однако всем им присущи общие недостатки:

1. Нестабильность потока из-за деградации тритиевой мишени (потеря 10–15 % эффективности за 500 ч [28]).

2. Фиксированная энергия нейтронов (например, 14,1 МэВ для D–T-реакций [21]).

3. Механический износ: запыление высоковольтного изолятора, пробои в ускорительных секциях, необходимость замены мишени каждые 1000–2000 ч [14].

На рис. 1 и 2 представлены варианты плазменного нейтронного генератора (источника нейтронов) с электронным управлением. Вариант на рис. 1 содержит источник тритиевой плазмы в качестве мишени и источник дейтериевой плазмы в качестве набегающего потока. Вариант на рис. 2 содержит источник тритиевой плазмы в качестве мишени, источник дейтериевой плазмы в качестве набегающего потока и поток бериллиево-литиевого бланкета в качестве активатора-катализатора. Основные принципы работы системы установки следующие:

1) электростатическое ускорение ионных и электронных компонентов плазмы;

2) переменное сжатие последовательных дискретных потоков ионов и электронов магнитной линзой;

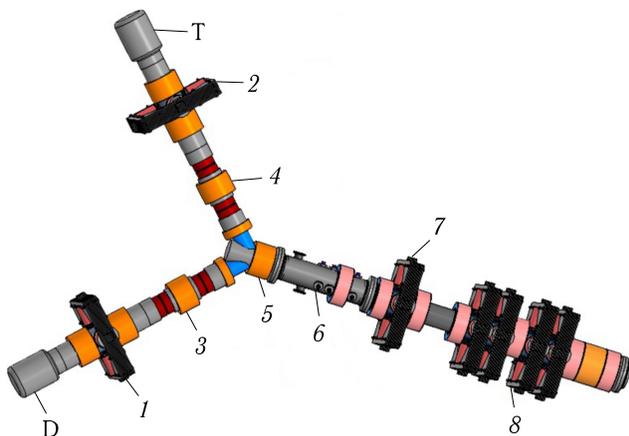


Рис. 1. 3D-модель устройства нейтронного генератора: D — дейтерий; T — тритий; 1, 2 — ионизаторы с накопителем; 3, 4 — ускорители; 5 — блок инжекторов ионов и электронов; 6 — плазмодинамический ускоритель; 7 — управляемый накопитель; 8 — камера (двухцикловая) синтеза

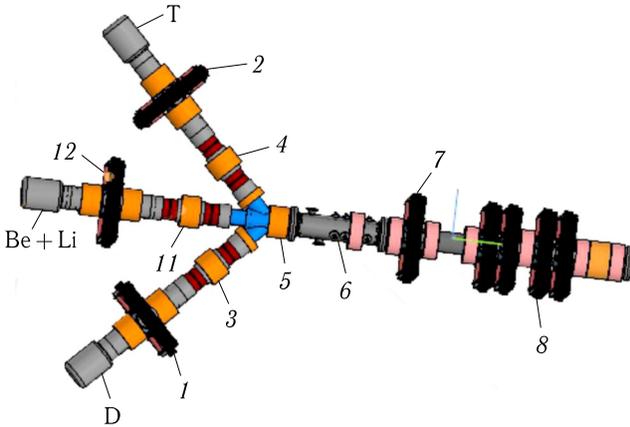


Рис. 2. 3D-модель варианта 2 устройства генератора с бериллий-литиевым (Be + Li) активатором-катализатором: D — дейтерий; T — тритий; 1, 2 и 12 — ионизаторы с накопителем; 3, 4 и 11 — ускорители; 5 — блок инжекторов ионов и электронов; 6 — плазодинамический ускоритель; 7 — управляемый накопитель; 8 — камера (двухцикловая) синтеза

3) обеспечение квазистабильности путем преобразования исходящих потоков во вращение динамической плазменной мишени после объединения потоков ионов и электронов;

4) торможение фронтального потока, который становится мишенью, и столкновение с новыми потоками частиц (встречно, синтез на встречных пучках);

5) внешняя и внутренняя электронная синхронизация системы, благодаря которой осуществляется реализация и выполнение вышеуказанных пунктов. Возможно отображать изменение координаты X по вертикальной оси и изменение координаты Y по горизонтальной оси вдоль устройства и получать поперечный коэффициент излучения (эмиттанс).

Поток плазмы в генераторе с литием состоит из тритиевой и дейтериевой плазмы. Реакция для генерации нейтронов $d + {}^7\text{Li} \rightarrow 2{}^4\text{He} + n + 15 \text{ МэВ}$. Экранирование нейтронного потока плотной плазмой происходит с реакциями $n + {}^6_3\text{Li} \rightarrow {}^3_1\text{H} + \alpha + 4,78 \text{ МэВ}$, $n + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \alpha + 2,79 \text{ МэВ}$. Также возможны другие типы реакций (табл. 1), например, для получения нейтронов и для компенсации.

Поток плазмы в генераторе состоит из тритиевой и дейтериевой плазмы. Тритиевая плазма с энергией до 50 кэВ вводится в комбинированную магнитооптическую ловушку, образуя плазменную тритиевую мишень. Дейтериевая плазма с энергией 100 кэВ инжектируется для взаимодействия с тритиевой плазменной мишенью. Из потока дейтериевой и тритиевой плазмы, где ядерная реакция происходит при бомбардировке потоком дейтронов плазменной тритиевой мишени, образуется направ-

Таблица 1. Энергетические параметры синтеза. Типы реакций

Реакция*	Энерго-выделение, МэВ	σ_{\max} , барн (в области энергии 1 МэВ)	Энергия налетающей частицы, МэВ
$d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17,6	5,0	0,13
$t + d \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17,6	5,0	0,195
$d + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li} + p$	5,0	0,001	1,0
$d + {}^6\text{Li} \rightarrow 2\,{}^4\text{He}$	22,4	0,026	0,60
$d + {}^7\text{Li} \rightarrow 2\,{}^4\text{He} + n$	15,0	10^{-3}	0,2

* Во всех приведенных реакциях налетающей частицей является первая слева.

ленный поток нейтронов с энергией 12 МэВ, генерируемый синтез-генератором: $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,6$ МэВ. Данная реакция экзотермическая и может протекать при сколь угодно малых энергиях дейтронов. Зависимость полного сечения реакции, в 10^{-24} см², от энергии дейтронов E_d в пределах 300 кэВ.

Конструкционные элементы нейтронного генератора представлены на рис. 1 и 2, а также в табл. 2. В плазменном генераторе происходит формирование ускоренных пучков ионов дейтерия и трития в вариантах 1 и 2 генератора, лития и бериллия в варианте 2 генератора, и затем, задавая в пролетных ускорительных трубках требуемую энергию ионов дейтерия и трития, проводится формирование плазменной мишени и плазменного набегающего потока. В сравнении с генерацией нейтронных импульсов длительностью 1–100 нс с использованием малогабаритных вакуумных ускорительных трубок в генераторе происходит формирование ускоренных пучков ионов лития, дейтерия и трития, а затем формирование плотной плазменной мишени и плотного набегающего потока. Это позволяет формировать на выходе импульсы нейтронов от единиц секунд до миллисекунд и до 10^{16} нейтрон/импульс [28].

Для инициализации реакций авторами были предложены конфигурации плазмы для плазменного электрического генератора [19], реакции в которой протекают в ходе заданных определенных циклов. В рассматриваемой схеме (см. рис. 1 и 2) распределения плазмы выполняются внутри камеры синтеза с магнитооптическими системами, состоящими из двух магнитооптических квадрупольных линз (двух двойных) и трех соленоидов, расположенных между линзами и предназначенных для накопления плазмы в магнитных квадрупольях. Реакции протекают не сразу, а реализуются за два цикла (см. табл. 1) в соответствии с положениями и распределениями плазмы относительно линз.

При взаимодействии дейтерия и трития в ходе реакций первого цикла происходит выгорание части мишени и формирование нейтронного потока, это инициирует каскад реакций второго цикла. По его завершению

Таблица 2. Конструкционные элементы нейтронного генератора и дополнительные блоки электрического плазменного генератора [19]

Тип	Описание
Вакуумный цилиндрический нагреватель, вольфрам-рениевый картридж	Цилиндрический титановый с нагревательной спиралью в виде диска или стержневого нагревателя вакуумного исполнения. Время нагрева до температуры от 980 до 1200 °С составляет от 3 до 8 с
Пушка электронная источника ионов	Термокатодная электронная пушка с выпускным бериллиевым окном и магнитной фокусировкой на ускоряющее напряжение до 6000 В
Источник ионов	Трехэлектродная система формирования ионного пучка. Частота тока между электродами от 20 до 500 кГц при давлении в камере от 200 до 1000 Па
Секция магнитооптического (МО) накопителя	Комбинированная магнитооптическая система
Ускорительная секция	Ускорительные трубки электростатические с импульсным режимом работы
Секция синтеза	Комбинированная магнитооптическая система из чередующихся управляемых магнитооптических систем
Секция МО накопителя камеры ионного нейтронизатора	Комбинированная магнитооптическая система
Секция камеры ионного нейтронизатора	Нейтрализатор выполнен по трехэлектродной схеме с электронной пушкой на ускоряющее напряжение до 6000 В
Картридж, схема питания	Корпус и электромеханика с блоком на 4 картриджа. Блок питания картриджа. Напряжение на накал +12 В/1,8 А постоянного тока. Напряжение +5 В/1,5 А и +12 В/1,5 А постоянного тока. Блок электронного управления с силовой автоматикой. Системы крепления узлов вакуумных приборов

Продолжение табл. 2

Тип	Описание
Пушка электронная источника ионов, схема питания	Механическая обвязка. Напряжение накала 12 В, ток 1,7 А. Источник высокого напряжения 1500 В, ток 0,125 А, 187,5 Вт, 3000 В, ток 0,0625 А, 375 Вт. Блок питания стабилизированный с выходом +5 В/1,5 А и +12 В/1,5 А постоянного тока. Выходное устройство электронной пушки, магнитная оптическая система. Напряжение питания +12 В/1,5 А постоянного тока. Блок управления МОС — развертка потока по горизонтали и вертикали
Источник ионов	Магнитная система МОС 1. Блок электронного управления с силовой автоматикой. Напряжение питания +12 В/1,5 А постоянного тока. Блок ВЧ-питания разрядной камеры источника ионов +12 В/1,5 А. Источник высокого напряжения 1500 В, ток 0,0625 А, 187,5 Вт, 3000 В, ток 0,0625 А, 375 Вт. Системы крепления узлов вакуумных приборов
Секция МО накопителя	Магнитная система МОС 1. Магнитооптическая квадрупольная система МКС 1. Магнитная система МОС 2. Блок электронного управления и силовой электроники IGBT
Ускорительная секция	Магнитная система МОС 1. МОС строчной и кадровой развертки модулятора. Блок электронного управления, блок силовой автоматки. Блок высокого напряжения 450 кВ, ток 6,25 мА, 2815 Вт. Блок управления БВН изменения, $U_1 = 400$ кВ, $U_2 = 450$ кВ. Блок цифрового управления с цифроаналоговым каналом. Блок управления МОС — развертка потока по горизонтали и вертикали
Секция синтеза	Магнитная система МОС 1. Магнитооптическая квадрупольная система МКС 1. Магнитная система МОС 2. Магнитооптическая квадрупольная система МКС 2. Блок силовой автоматки на два канала 2-МКС. Блок процессорного управления с USB и электронного управления с блоком интерфейса оптоэлектронной развязки

Окончание табл. 2

Тип	Описание
Секция МО накопителя камеры ионного нейтрализатора	<p>Магнитная система МОС 1. Магнитооптическая квадрупольная система МКС 1. Магнитная система МОС 2. Блок электронного управления. Блок силовой электроники IGBT. Системы крепления узлов вакуумных приборов</p>
Пушка электронная ионного нейтрализатора	<p>Механическая обвязка. Напряжение накала 12 В, ток 1,7 А. Источник высокого напряжения 1500 В, ток 0,125 А, 187,5 Вт, 3000 В, ток 0,0625 А, 375 Вт. Блок питания стабилизированный с выходом +5 В/1,5 А и +12 В/1,5 А постоянного тока. Выходное устройство электронной пушки, магнитная оптическая система. Напряжение питания +12 В/1,5 А постоянного тока. Блок управления МОС — развертка потока по горизонтали и вертикали. Системы крепления узлов вакуумных приборов</p>
Секция камеры ионного нейтрализатора	<p>Магнитная система, механическая обвязка. Магнитная система МОС 1. Блок электронного управления с силовой автоматикой. Напряжение питания +12 В/1,5 А постоянного тока. Блок ВЧ-питания разрядной камеры источника ионов +12 В/1,5 А. Источник высокого напряжения 1500 В, ток 0,0625 А, 187,5 Вт, 3000 В, ток 0,0625 А, 375 Вт. Системы крепления узлов вакуумных приборов</p>

на соленоиды подается напряжение таким образом, что поток плазмы между двумя дублетами становится непрерывным, а дискретный характер инициирования реакций, имевший место в первом цикле, исчезает. Это необходимо для поддержания непрерывной реакции в течение двух циклов. В магнитооптической системе второго цикла на тритиевой мишени формируется плотный поток нейтронов требуемой конфигурации.

Для описания долговременной (относительно высоких скоростей ионов) эволюции магнитного поля будем считать его «вмороженным» в ионы плазмы, B и n изменяются согласованно:

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nv)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial(Bv)}{\partial x} = 0 \end{cases} \rightarrow \frac{d}{dx} \frac{B}{n}. \quad (1)$$

Необходимо также учитывать изменение концентрации плазмы при ее послонной динамике: коэффициент диффузии пропорционален B^2/n , следовательно,

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(B^2 \frac{\partial B}{\partial x} \right). \quad (2)$$

Во втором цикле предварительно нагретая и сжатая плазма трех типов сначала вступает в конвекционное взаимодействие: ионы ${}^7\text{Li}$ и ${}^9\text{Be}$ взаимодействуют (в ограниченной области, определяемой аберрациями, дипольным членом магнитного поля, юстировкой) с потоками нейтронов при экранировании от стенки камеры.

Уравнения, описывающие сферическую кумуляцию ударных магнитных волн, в первом приближении можно представить как фокусировку ударных волн в теплопроводящем газе. В системе координат, связанной с фронтом ударной волны, имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} \rho u = \rho_0 D, \\ p + \rho u^2 = p_0 D^2, \\ \rho u \left(\frac{u^2}{2} + \frac{p}{p(\gamma - 1)} \right) + pu + Q = p_0 \frac{D^3}{3}, \end{cases} \quad Q = \frac{lc}{3} \frac{d}{dx} \left(\frac{4\sigma T^4}{c} \right), \quad (3)$$

где Q — поток теплового излучения; σ — постоянная Стефана–Больцмана; c — скорость света; γ — число степеней свободы иона; u — начальная скорость ударной волны; p, ρ, T — давление, плотность и температура соответственно.

Большое количество быстрых нейтронов, образующихся в ходе реакций дейтерий–третиевого цикла, будет поглощаться в зоне конвекции слоем лития или бериллия с дополнительным выделением и поглощением тепловой энергии, что также повысит возможность генерации дополнительных потоков нейтронов из плазмы.

Плазмодинамическая магнитооптическая камера используется для формирования сжатого потока плазмы. В камеру вводятся последовательно потоки тритиевой и дейтериевой плазмы. Далее располагается магнитооптическая камера синтеза для формирования запертой в магнитной ловушке тритиевой плазмы с формированием мишени и последующей бомбардировкой дейтериевой плазмой. Для вывода отработанной мишени и гелия установлен магнитооптический управляемый сепаратор. Вывод пучка нейтронов на мишень осуществляется через нейтронный излучатель как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Значение интенсивности формируемого пучка нейтронов может изменяться от 10^{10} до 10^{16} с^{-1} и выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание различных типов генераторов нейтронов на основе технологии управления плазменными потоками может быть экономически выгодным в качестве источников нейтронов различного назначения, например, стоимость производства радиоизотопов может быть снижена в несколько раз. Были разработаны методика и технология создания и формирования электронно-управляемых потоков ионов и плазмы в магнитных полях путем группировки потоков и установления определенных законов последовательности для потоков ионов и плазмы. Собрана экспериментальная и опытно-промышленная установка электрогенератора плазмы с электронным управлением, состоящая из вакуумной подсистемы, блоков электронной системы управления, использующая реакции без нейтронов.

Ресурс работы (10 000 ч для плазменных без твердотельной мишени и 1000–2000 ч для традиционных генераторов) и регулируемость спектра энергии нейтронов (2,5–14,1 МэВ) через управление параметрами плазмы представляются оптимистическими.

Возможно, в перспективе — использование нейтронного генератора и активации полупроводниковых материалов для радиационно-индуцированного дефектообразования при инъекции нейтронов и образовании гамма-излучения в результате взаимодействия с полупроводниковыми пластинами из карбида кремния. Проведены предварительные эксперименты на установке с плазменным электрическим генератором для облучения полупроводниковых гетероструктур с целью создания радиационно-индуцированных дефектов. Планируется на основе рассмотренной технологии нейтронного генератора с плазменной мишенью с импульсом потока нейтронов более 10^{10} с^{-1} представить модели радиационно-индуцированного дефектообразования и пространственной самоорганизации дефектов при инъекции электронов, альфа-частиц, гамма-излучения и нейтронной активации в кремнии и карбиде кремния.

Благодарности. Авторы выражают благодарность оргкомитету Научной сессии секции ядерной физики ОФН РАН за возможность обсуждения данной работы и плодотворные дискуссии.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Uesaka M., Kobayashi H.* Compact Neutron Sources for Energy and Security // Rev. Accel. Sci. Technol. 2015. V. 8. P. 181–207.
2. *Бажажин А. Г., Жураев О. Ш. и др.* Ядерно-физические методики на базе нейтронного генератора НГ-150 Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан // Междунар. журн. гуманитар. и естеств. наук. 2016. Т. 3, № 1. С. 210–214.
3. *Leung K. N., Leung J. K. et al.* Feasibility Study on Medical Isotope Production Using a Compact Neutron Generator // Appl. Radiat. Isotopes. 2018. V. 137. P. 23–27.
4. *Бахранов О., Артемов С. и др.* Методика измерения спектров нейтронов путем регистрации ядер отдачи на базе нейтронного генератора НГ-150 ИЯФ АН РУз // Физ.-мат. науки. 2020. Т. 1, № 5. С. 21–30.
5. *Иванов А. А., Смирнов А. Н.* Ускорительный источник нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии // УФН. 2022. Т. 192, № 8. С. 893–912.
6. *Бикчурина М. И., Быков Т. А. и др.* Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для бор-нейтронозахватной терапии и других приложений // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 1021–1026.
7. *Кошкарев А. М., Таскаев С. Ю.* Разработка и внедрение системы автоматизации ускорительного источника нейтронов для борнейтронозахватной терапии // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 869–875.
8. *Shimura F.* Single-Crystal Silicon: Growth and Properties // Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials. Springer Intern. Publ., 2017.
9. *Балдин А. А., Белов Е. М., Галанин М. В. и др.* Ядерные релятивистские технологии (ЯРТ) для производства энергии и утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Результаты первых экспериментов по физическому обоснованию ЯРТ // Письма в ЭЧАЯ. 2011. Т. 8, № 6(169). С. 1007–1023.
10. *Svirkov V., Elisov M., Dolgoplov M., Radenko V.* Synthesis-Neutron Generator and Activation of Semiconductor Materials // Fundamental and Applied Problems of Modern Physics. Sec. III. 2023. P. 98–100.
11. *Leung K. N.* New Compact Neutron Generator System for Multiple Applications // Nucl. Technol. 2020. V. 206, No. 10. P. 1607–1614.
12. *Mausolf E. J., Johnstone E. V.* Fusion-Based Neutron Generator Production of Tc-99m and Tc-101: A Prospective Avenue to Technetium Theranostics // Pharmaceuticals. 2021. V. 14, No. 9. P. 875.
13. *Pudjorahardjo D. S., Wahyono P. I.* Compact Neutron Generator as External Neutron Source of Subcritical Assembly for Mo-99 Production (SAMOP) // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2296, No. 1. P. 020115.
14. *Браун И. Дж.* Физика и технология источников ионов. Испр. и доп. изд. М.: Мир, 2004.
15. *Mesyats G. A.* Pulsed Power. New York: Springer, 2005. 568 p.

16. *Forrester A. T., Alton G. D.* Large Ion Beams: Fundamentals of Generation and Propagation // *Phys. Today*. 1989. V. 42, No. 6. P. 77–78.
17. *Dlougach E., Shlenskii M., Kuteev B.* Neutral Beams for Neutron Generation in Fusion Neutron Sources // *Atoms*. 2022. V. 10, No. 4. <https://www.mdpi.com/2218-2004/10/4/143>.
18. *Chepurnov V., Dolgopолоv M., Akimchenko A. et al.* Betavoltaic Device in por-SiC/Si C-Nuclear Energy Converter // 23rd Intern. Workshop “High Energy Physics and Quantum Field Theory”; *Eur. Phys. J.* 2017. V. 158. P. 06004.
19. *Долгополов М. В., Свирков В. Б., Раденко В. В. и др.* О возможности инициализации синтеза в малогабаритных установках с квадрупольными магнитными системами со сферической кумуляцией ударных магнитных волн в бланкетной конфигурации дискретов плазмы // *Comput. Nanotechnol.* 2023. V. 10, No. 2. P. 70–88.
20. *Wesson J.* Tokamaks. 4th ed. Oxford: Oxford Univ. Press, 2011.
21. *Kulcinski G. L., Radel R. F., Davis A.* Near Term, Low Cost, 14 MeV Fusion Neutron Irradiation Facility for Testing the Viability of Fusion Structural Materials // *Proc. 12th Intern. Symp. on Fusion Nuclear Technology-12 (ISFNT-12)*. Fusion Engineering and Design. 2016. V. 109–111. P. 1072–1076; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379616300229>.
22. *Chipura A. S., Dolgopолоv M. V.* Heterojunction Betavoltaic Si14C-Si Energy Converter // *J. Power Sources*. 2024. V. 613. P. 234896.
23. *Chepurnov V. I., Dolgopолоv M. V., Gurskaya A. V. et al.* Radiation-Doped SiC*/Si Heterostructure Formation and Defects Evolution // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2022. V. 2155. P. 012012.
24. *Гурская А. В., Долгополов М. В., Елисов М. В., Чепурнов В. И.* Радиационное дефектообразование в бета-преобразователе на карбиде кремния // *Письма в ЭЧАЯ*. 2023. Т. 20, № 5(250). С. 1238–1243.
25. *Chepurnov V. I., Dolgopолоv M. V., Gurskaya A. V. et al.* C-Betavoltaic Energy Converter in por-SiC/Si // *Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transform.* 2017. V. 3, No. 3. P. 119–120.
26. *Dolgopолоv M., Radenko V., Svirkov V. et al.* Electronically Driven Neutrons Synthesis-Generator with the Magneto-optical Flow Seal // *Proc. XXIV Intern. Workshop “High Energy Physics and Quantum Field Theory”*. *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2019. V. 222. P. 02014.
27. Патент на изобретение 2757666 С1, 20.10.2021. Заявка № 2021105186 от 01.03.2021. Бюл. № 29. 20.10.2021. Электронно-управляемый плазменный электрический генератор / Долгополов М. В., Занин Г. Г., Овчинников Д. Е. и др.
28. *Диденко А. Н., Шиканов А. Е., Ращиков В. И., Рыжков В. И., Шатохин В. Л.* Генерация наносекундных нейтронных импульсов в вакуумных ускорительных трубах // *ЖТФ*. 2014. Т. 84, № 6. С. 119–125.