

Electronically driven neutrons synthesis-generator  
based on a standard four-cycle generator  
with the magneto-optical flow seal  
Разработка электронно-управляемого импульсного  
синтез-генератора нейтронов  
based on a standard four-cycle generator

В.Раденко, А.Раденко, В.Свирков,  
А.Гурская, А.Привалов, М.Долгополов

TP A&ST & SAMARA POLYTECH

ЛФВЭ, ОИЯИ, г. Дубна, 2019



Гарольд Юри в 1934 г. получил Нобелевскую премию по химии «За открытие тяжелого водорода» (дейтерия, используемого для получения тяжелой воды — замедлителя в ядерных реакторах, а также в качестве индикатора биохимических реакций в живой ткани).

H.C. Urey, F G. Brickwedde, G.M. Murphy, Phys.Rev. 39 (1932) 164

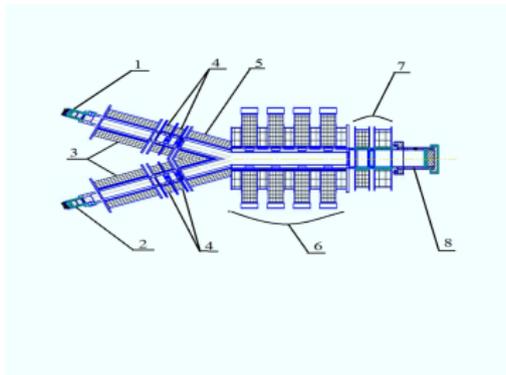


Figure: Синтез-генератор

- 1 Ионизатор дейтерия и лития
- 2 Инжектор
- 3 Линейный ускоритель
- 4 Магнитооптический накопитель – формирователь ионов  $^2\text{H}$ ,  $^7\text{Li}$
- 5 Ускоритель-формирователь
- 6 Магнитодинамическая 4 циклическая камера
- 7 Магнитооптический накопитель-ограничитель
- 8 Система вывода нейтронов

Математический аппарат электронно-управляемого импульсного синтез-генератора нейтронов базируется на методе формирования дискретных потоков ионов для формирования в магнитооптической ловушке литиевой или тритиевой мишени с программно заданными параметрами концентрации ионов формируемой мишени и набегающего потока протонов с реализацией электронно-управляемого ядерного синтеза. Начальный поток ионов  $P_i$  источника ионов электрода, выполненного по трёхэлектродной схеме, с одной стороны электродов которой установлена электронная пушка. Известно, что при достаточно высоких частотах свободные электроны успевают сместиться на большие расстояния и достигают электродов, и в то же время ионы с большой массой за время полупериода колебаний не успевают сместиться на значительные расстояния и концентрация положительных ионов в межэлектродном пространстве растет, что приводит к появлению «объёмного заряда».

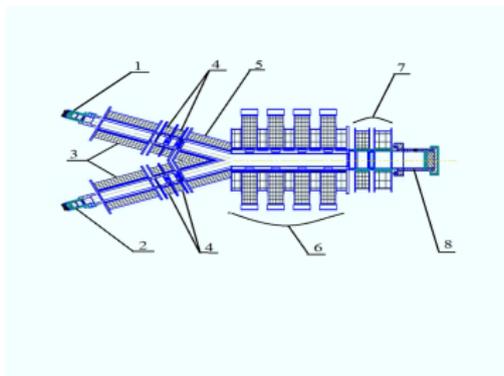
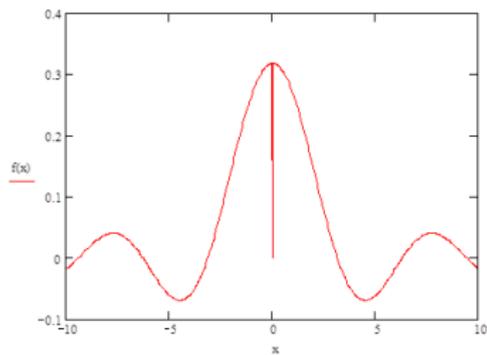
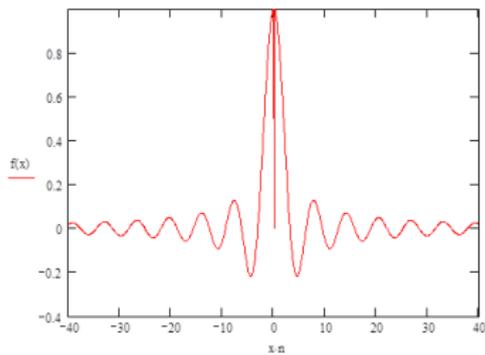


Figure: Синтез-генератор

Начиная с частот свыше десятков килогерц электрическая прочность газов уменьшается так как вероятность столкновения ионов с молекулами возрастает, а увеличение частоты электрического поля приводит к тому, что за время полупериода положительные ионы и электроны не успевают сместиться на значительные расстояния, не вылетая из межэлектродного пространства. Вероятность рекомбинации заряженных частиц растет, и их концентрация падает, а снижение времени полупериода требует увеличения силы, действующей на ионы, чтобы хватило кинетической энергии для ионизации молекул. При частотах, превышающих один мегагерц, электрическая прочность газов возрастает. Учитывая, что минимальная электрическая прочность газового промежутка имеет место при давлении 800 Па, то давление в камере источника ионов выбрано в интервале 200 – 800 Па для этого из линейных потоков ионов  $P_i$ , формируемых источником ионов с начальным током  $I_0$  происходит их разбиение на потоки  $I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0n}$ , с периодом следования  $(T_{01} \dots T_{0n})$  в линейном накопителе-формирователе, представляющем из себя чередование цилиндрических магнитных систем и квадрупольных линз. Управление направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  цилиндрической магнитной системы позволяет формировать потоки  $I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0n}$ , с периодом следования  $(T_{01} \dots T_{0n})$  по заданной импульсной функции ( $\delta$ -функции).



$$f(x) = \frac{\sin(x)}{\pi x}$$



$$f(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$$

Дальнейшее группирование позволяет получить ионные потоки высокой плотности. Требуемые значения энергии  $E_k$  частиц достигаются заданием параметров ускоряющего напряжения импульсного линейного электростатического ускорителя. Изменение значений ускоряющего напряжения от  $U_{\min}$  до  $U_{\max}$  позволяет формировать для каждого единичного потока значения от  $E_{\min}$  до  $E_{\max}$  таким образом, что в магнитооптической ловушке камеры синтеза, используя разность хода первого и  $n$ -го потока при заданной напряженности магнитного поля, уплотняют поток до требуемых значений для получения синтеза ядер. Также на выходе электростатического ускорителя установлена магнитооптическая система развертки потоков. В данном случае имеет место два типа развёртки потока: аналоговый и цифровой. Аналоговый – это когда поток ионов движется вдоль магнито-оптической оси и проходит в магнитооптическую систему отклоняющей катушки. Назначение отклоняющей системы состоит в том, чтобы ионный пучок мог перемещаться во времени в поперечном направлении перпендикулярно оптической оси.

Развертка пучка ионов по оси OX и OY осуществляется путем изменяющегося во времени сигнала и формирование сигнала строчной и кадровой развертки для каждого отдельного потока ионов. Возможно использование как нелинейно-строчной развертки, так и прямоугольной линейно-строчной периодической развертки. Синхронизация развёртки обеспечивает в один временной момент получение n потоков на входе магнитной квадрупольной линзы (МКЛ). Цифровая развертка предполагает управление катушкой развертки методом Квадратичных Амплитуд – это технология генерации управляющего сигнала по оси OX и OY (I и Q компоненты) из импульсного аналогового сигнала на два сигнала одинаковой частоты сдвинутые относительно друг друга на  $90^0$ , каждая из которых промодулирована по одному из двух или более дискретных уровней амплитуды.

Комбинация всех уровней амплитуды этих двух сигналов представляет собой бинарную битовую картину. I и Q компоненты – это две половины битовой картины формируемого дискретного ионного потока следуемые одновременно, а уровни напряжения двух идентичных частотных управляющих сигналов сдвинутых по фазе на  $90^0$ . Компонента I сигнал без сдвига фазы, а компонента Q сигнал со сдвигом  $90^0$ .

Координата I определяет горизонтальную позицию точки, а Q — вертикальную. Диаграмма Созвездия в этой матрице образуется из горизонтальных и вертикальных линий, соединяющих возможные значения компонент I и Q. Целочисленное значение каждой полученной точки определяется ячейкой матрицы, в которую она попадает. 64-QA диаграмма — это 8x8 матрица, в которой каждая из 64 ячеек представляет одну из 64 возможных бинарных комбинаций. Вертикальное и горизонтальное положение каждой точки соответствует I и Q уровням амплитуды управляющего сигнала, поданного на отклоняющую катушку в течение одного цикла. 64-QA диаграмма представлена на Рисунке 1:

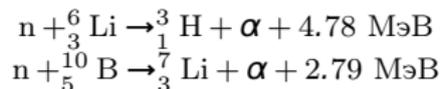


Таким образом, потоки I01, I02, ..., I0n, с периодом следования (T01... T0n), в матричном порядке укладываются в одну часть фазового пространства.

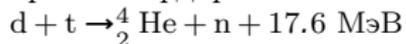
Генератор нейтронов состоит из трёх секций синтез-генераторов. В первой формируются поток протонов, а во втором поток ионов мишени. Поток ионов в синтез-генераторе состоит из литиевой и дейтериевой компонент. Слой литий-дейтериевой компонент со средней энергией 200 кэВ. Третья секция формирует верхний плотный слой литиевой или бор плазмы со средней энергией 250 кэВ для экранирования дрейфовых нейтронов. Направленный поток нейтронов с энергией 12 МэВ, генерируемый синтез-генератором.

Реакция для генерации нейтронов  $d + {}^7\text{Li} \rightarrow 2{}^4\text{He} + n + 15 \text{ МэВ}$

Экранирование нейтронного потока плотной плазмой реакции:



Из потока дейтериевой и тритиевой плазмы, где ядерная реакция происходит при бомбардировке потоком дейтронов плазменной тритиевой мишени.



Эта реакция – экзотермическая и может протекать при сколь угодно малых энергиях дейтронов.

Зависимость полного сечения реакции, от энергии дейтронов  $E_d$ , кэВ, в пределах до 300 кэВ представлена в таблице

№	Реакция	Энерговывделение МэВ	$\sigma_{\text{пол.}}$ , барн (в области энергий меньше или равно 1 МэВ)	Энергия налетающей частицы в соответствующая $\sigma_{\text{пол.}}$ , МэВ
1	$d+{}^7\text{Li} > {}^4\text{He}+n$	15.0	$10^{-3}$	0,2
2	$d+t > {}^4\text{He}+n$	17.6	5.0	0.13
3	$t+d > {}^4\text{He}+n$	17.6	5.0	0.195

В сравнении с генерацией нейтронных импульсов с длительностью 1 – 100 нс с использованием малогабаритных вакуумных ускорительных трубок, где выход нейтронов составляет  $2 * 10^7$  н/имп в синтез-генераторе происходит формирование ускоренных пучков ионов лития, дейтерия и трития, а затем формирование плотной ионной или плазменной мишени и плотного набегающего потока, что позволяет формировать импульсы нейтронов от единиц секунд до миллисекунд  $2 * 10^{10}$  н/имп и до  $2 * 10^{14}$  н/имп.

Утилизация части энергии синтеза происходит путем преобразования энергии квантовыми энергетическими приборами – мощными пролетными СВЧ-приборами – клистродами, работающими на преобразовании кинетической энергии ионов в СВЧ-колебания. Мощные вакуумные клистроны предназначены для усиления токов высокой частоты на частотах от 2,5 ГГц до 300 ГГц. Многорезонаторный клистрон – это усилительный электровакуумный СВЧ-прибор с кратковременным взаимодействием электронного потока с продольной составляющей провисающего электрического поля нескольких резонаторов (3 – 5), использующий для модуляции электронного потока по плотности метод дрейфа.

Применение:

1. Модульные плазменные электрические генераторы
2. Модульные плазменные теплофикационные установки
3. Для СВЧ-печей в качестве генератора тока
4. Вакуумные СВЧ-сушильные камеры для различного типа древесины
5. СВЧ-Сушильные камеры для различного материалов и руд
6. Широкополосные радиопередающие устройства
7. Различные типы плазмотронов большой мощности
8. В качестве модулятора как источника активных помех

серии КЭП	Частота минимальная, МГц	Частота максимальная, МГц
серии QEC -UHxx	300	3 000
серии QEC -SHxx	3 ГГц	30 ГГц
серии QEC -EHxx	30 ГГц	300 ГГц

Реакция для генерации нейтронов  $d + {}^7\text{Li} \rightarrow 2{}^4\text{He} + n + 15 \text{ МэВ}$  можно использовать в малогабаритном генераторе нейтронов для нейтронного гамма каротажа. Используя в качестве мишени литий дейтериевую компоненту и набегающий литий дейтериевый поток.

Реакции	Энергевыделение, МэВ	$\sigma_{\max}$ , барн (где $\leq$ 1 МэВ)	Энергия налетающ. частицы, МэВ
1) $p + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He}$	4.0	$10^{-4}$	0.3
2) $p + {}^7\text{Li} \rightarrow 2\text{He} + \text{He}$	17.3	$6 * 10^{-3}$	0.44
3) $d + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li} + p$	5.0	0.001	1.0
4) $d + {}^6\text{Li} \rightarrow 2{}^4\text{He}$	22.4	0.026	0.60
5) $d + {}^7\text{Li} \rightarrow 2{}^4\text{He} + n$	15.0	$10^{-3}$	0.2
6) $p + {}^9\text{Be} \rightarrow 2{}^4\text{He} + d$	0.56	0.46	0.33
7) $p + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Li} + {}^4\text{He}$	2.1	0.35	0.33
8) $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3{}^4\text{He}$	8.7	0.6	0.675
9) $p + {}^{15}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$	5.0	0.69 (at 1.2 MeV)	1.2

## Sections of Generator

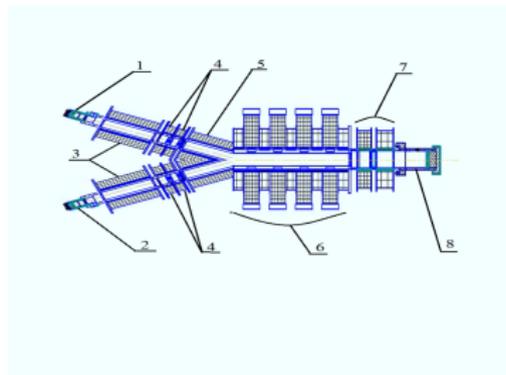


Figure: Синтез-генератор

- 1 Ионизатор дейтерия и лития
- 2 Инжектор
- 3 Линейный ускоритель
- 4 Магнитооптический накопитель – формирователь ионов  $^2\text{H}$ ,  $^7\text{Li}$
- 5 Ускоритель-формирователь
- 6 Магнитодинамическая 4 циклическая камера
- 7 Магнитооптический накопитель-ограничитель
- 8 Система вывода нейтронов

## Структура генератора

Наименование узла	Назначение узла
Ионизатор дейтерия, трития, лития	Ионизация дейтерия, трития, лития
Инжектор ионов дейтерия, трития, лития	Инжектор на энергию 25 кэВ
Магнитооптический нак.-форм. ионов	Дискретные потоки ионов в ускоритель
Ускоритель-формирователь линейный $^2\text{H}$	На энергию от 130 кэВ до 250 кэВ
Линейный уск.-форм. ионов трития	На энергию от 200 кэВ до 400 кэВ
Линейный уск.-форм. ионов $^7\text{Li}$	На энергию от 200 кэВ до 300 кэВ
1-ая Выходная магнитодинамическая камера	Синтез $^7\text{Li}$ с $^2\text{H}$
Магнитооптический накопитель-ограничитель	Задержка заряженных ионов
Система вывода нейтронов	

## Модель сиинтез-генератора

- Вакуумный цилиндрический картридж-испаритель с гидридом лития
- Пушка электронная источника ионов
- Плазменный источник ионов лития и водорода
- Секция магнитооптического накопителя ионов лития и водорода
- Ускорительная секция ионов лития и водорода
- Секция синтеза ионов лития и водорода восьми-цикловая
- Квантовый энергетический прибор (Пролётный ВЧ-прибор) на частоту до 1 МГц
- Секция магнитооптического накопителя камеры ионного нейтрализатора
- Секция магнитооптического накопителя камеры ионного нейтрализатора
- Система воздушного охлаждения с теплообменным аппаратом
- Электронная система управления генератором
- Основание и кожух генератора

Магнитодинамическая N-цикловая камера синтеза состоит из чередующихся МОС – магнитооптических систем синтеза, выполненных по схеме совмещения магнитных квадрупольных линз (МКЛ), обеспечивающих «сильную» фокусировку методом сжатия дискретных ионных пучков гиперболическими полями разделенных магнитооптической системой формирователей-ограничителей, выполняющих функцию запираания или пропуска дискретного потока. Нахождение эффективной длины МКЛ проводим геометрически по реальным и идеальным полям:  $L_{ef} = \frac{1}{G_0} \int_{-\infty}^{+\infty} G(z)dz$ . Поле в апертуре квадрупольных линз удовлетворяет статическим уравнениям Максвелла:  $\text{rot}\vec{B} = 0$ ,  $\text{div}\vec{B} = 0$ , потенциал статического магнитного поля  $\vec{B} = \text{grad}U_0$ , удовлетворяющее уравнению Лапласа в цилиндрических координатах, общее решение которого записывается в виде  $U(r, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} r(a_n \sin(n\varphi) + b_n \cos(n\varphi))$ . Исходными параметрами при конструкторском расчете квадрупольной линзы определяются градиент фокусирующего поля, расстояние от оси линзы до полюса и число ампер-витков, необходимых для создания поля с заданным градиентом, который определяется из интегрального уравнения Максвелла:  $\int_{\Gamma} \vec{H}d\vec{l} = \int_S \vec{j}d\vec{S}$ . Вычисляя интегралы в левой и правой части получим  $\frac{Ga^2}{\mu_0} = 2NI$ , где  $NI$  – число ампер-витков,  $G$  – градиент поля. Величина поперечного градиента поля, которая связана с величиной тока питающих катушек полюсов и  $B_p$  магнитной индукции на полюсе  $G = \frac{B_p}{r_a}$ . Здесь  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $NI$  – количество ампер-витков в возбуждающей катушке полюса,  $k$  – коэффициент, учитывающий физические свойства материала полюсов и ярма магнитной квадрупольной линзы;  $a$   $r_a$  – радиус апертуры линзы.

Уравнений движения заряженных частиц в электромагнитном поле квадрупольных линз, которое задается уравнением Ньютона–Лоренса ( $v = \frac{dR}{dt}$ ):

$$\frac{dm\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}]), \quad (1)$$

где  $R$  — радиус-вектор наблюдаемой частицы в лабораторной системе координат,  $m$  — масса частицы,  $q$  — заряд частицы,  $\vec{v}$  — вектор скорости частицы,  $\vec{E}$  — вектор напряженности электрического поля,  $\vec{B}$  — вектор магнитной индукции. Тогда второй компонент 1 может быть записан так ( $v_{ij} = \frac{dR}{dt}$ ):

$$\frac{dmv_{ij}}{dt} = q(E + [v_{ij} \times B]) \quad (2)$$

Движение дискретов имеет сложную пространственную природу, но если скорость лежит в плоскости симметрии, то движение дискретно, чтобы быть плоским. Квадрупольные линзы называются поперечными линзами, магнитные поля которых оказывают более сильное влияние на движение частиц по сравнению с продольными. Для дискретного движения в квадрупольной линзе в плоскости  $y = 0$  сила  $F_x = ev_z B_y$ , где  $e$  — заряд частицы,  $v_z$  — продольная скорость частицы равна значению полной скорости при  $y = 0$ .

Уравнение движения для дискретных потоков движущихся прямолинейно относительно оси МКЛ:

$$\frac{dQ}{dz} = f(B(x, y, z), x', y', \delta), \quad (3)$$

где  $Q(x, y, x', y')^T$  - вектор траекторных фазовых координат частицы,  $\delta = \frac{\Delta p}{p_0}$  - разброс частиц по импульсу;  $B(x, y, z)$  - распределение вектора магнитной индукции вдоль оси МКЛ.

Так как эти уравнения движения являются нелинейными относительно фазовых координат, то можно найти приближенное решение переходя от траекторного фазового пространства к пространству траекторных фазовых моментов для дискретных потоков движущихся прямолинейно относительно оси МКЛ.

$Q(x, y, x', y')^T \rightarrow Q^*(x, y, x', y')^T$ , где  $Q^*$  - вектор траектории фазовых координат частицы. Тогда уравнение движения записывается в виде:

$$\frac{dQ^*(z)}{dz} = P(z)Q^*(z), \quad Q^*(z_0) = Q_0^*, \quad (4)$$

где  $P(z)$  - квадратная матрица которая определяется из осевого распределения магнитного поля МКЛ;  $Q^*$  - траекторные фазовые моменты размерности третьего порядка.

Для более рационального решения нужно найти матричную функцию  $K(\frac{z}{z_0})$ . Преобразование координат траекторных фазовых моментов каждого дискрета на плоскости перпендикулярной оси с координатой  $z_0$  на входе в МКЛ в плоскость  $z_1 \geq z$ , где  $z_1$  плоскость на выходе МКЛ. Тогда представим в виде:

$$\frac{dK(\frac{z}{z_0})}{dz} = P(z)K(\frac{z}{z_0}), \quad K(\frac{z}{z_0}) = E, \quad (5)$$

где  $E$  - единичная матрица. Для каждой МКЛ, а их в синтез генераторе от 4-х до 16-ти, в нашем случае 8-мь, зная матричную функцию преобразований можно описать динамику движения дискретов по всей камере синтеза серий матричных преобразований координат её траекторных фазовых моментов

Задавая каждому потоку временной интервал  $\tau_{ij}$ , определяющий параметр следования ( $k_i, k_j$  каждого дискрета  $D$ . Для каждого  $\tau_{ij}$  соответствует набор значений  $U_{ij}, I_{ij}$ , дискретного потока  $z_{ij}$ .  $U_{ij}$  - матрица значений ускоряющих напряжений ускорителя-формирователя и  $I_{ij}$  - матрица значений электрического тока ускорителя-формирователя. Вообще,  $U_{ij}, I_{ij}$  соответствует  $P_{ij}$  - матрица значений электрической мощности для заданного ускоряющего напряжения ускорителя-формирователя.

Тогда для формирования многофазного потока будет иметь место:

$$F_i(D) = \sin \omega t + \phi_i, F_i(D) = \sin \omega t + \phi_n, F_j(D) = \cos \omega t + \phi_i, F_j(D) = \cos \omega t + \phi_n \quad (6)$$

где  $F_i(D)$  - функция  $i$ -ой компоненты,  $F_j(D)$  - функция  $j$ -ой компоненты,  $\omega$  - частота следований дискретов,  $\phi_i, \phi_n$  - фазы ввода дискретного потока.

Одним из вариантов реализации метода формирования дискретных потоков с различными траекторными фазовыми значениями вводящиеся прямолинейно относительно оси МКЛ является квадратурная развертка по осям  $x, y$  в выходном ускорителе-модуляторе. На МОС развертки с ЦАП подаётся отклоняющее напряжение с функционально заданными значениями, что позволяет формировать на входе МКЛ распределенные в пространстве многофазные дискретные потоки.

- Моделирование процессов формирования ионных пучков в зондах с распределенными системами магнитных квадрупольных линз С.В. Колинко, А.Г. Пономарев, А.А. Дрозденко ЖУРНАЛ НАНО- и ЭЛЕКТРОННОЙ ФИЗИКИ JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS Том 4 № 3, 03018(5cc) (2012)
- Khodzhbagiyan H. et al.. 2014. Superconducting Magnets for the NICA Accelerator-Collider Complex pp. 4001304, June. IEEE Trans.Appl.Supercond.,24,N3 (параметры дипольного магнита)
- Андрианов С. Н. Динамическое моделирование систем управления пучками частиц. Издательство СПбГУ, СПб, 2002.
- Гаврилов Н.М., Сомов С.В. Оборудование для работы с ускоренными пучками: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 224 с.
- Терешонков Ю.В. Математическое моделирование краевых полей в системах управления пучками частиц // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2010. N2. С. 80-94.

## Назначение и итог

- контроль технологических процессов промышленных производств;
- нейтронная терапия;
- нейтронная радиография и томография;
- исследования по физике ядерных реакторов;
- обнаружение и контроль содержания ядерных материалов;
- геофизические исследования.

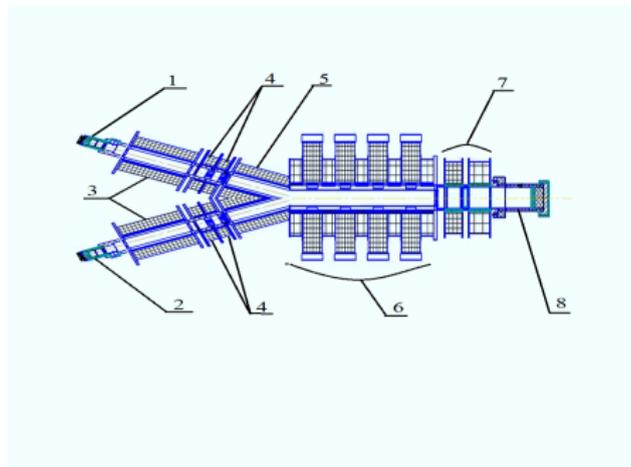


Figure: Синтез-генератор

## Possible application. Carbon-14

1. Производство  $C-14$  в плотном потоке ионной плазмы значительно дешевле, чем производство  $Ni-63$  в никелевой мишени, за счет низкой стоимости  $N-14$ .
2. Ионно-плазменная имплантация  $C-14$  на подложку  $SiC$  позволяет сократить процесс кристаллизации и реализовать широкое производство полупроводниковых преобразователей на  $C-14$ .
3. В то же время, производство  $Ni-63$  по этой технологии также возможно, и стоимость будет значительно снижена по сравнению с традиционными методами. Из-за большей массы ионов оборудование для ионно-плазменного напыления с уплотнением потока ионов никеля будет в несколько раз дороже из-за увеличенной рабочей площади установки. На данном этапе более сложным является производство  $C-14$ .
4. Удельная активность  $C-14$  отличается от  $Ni-63$  примерно в 10 раз на единицу объема, что обусловлено огромной разницей в сроках полураспада.
5. Самопоглощение  $Ni-63$  больше примерно в три раза, что приводит к максимальному пределу оптимальной толщины слоя до 4 мкм, а для  $C-14$  эта толщина может достигать 60 мкм, что лучше подходит. Общее количество изотопа  $C-14$  может быть на порядок больше, следовательно, гарантирована большая мощность для одного и того же размера силовых преобразователей.
6. Удельная мощность  $Ni-63$  на грамм вещества в 5 раз (за счет большей активности) превышает плотность мощности  $C-14$ . Но максимальная и средняя энергии электронов при распаде  $C-14$  в 2, а то и в 3 раза больше, чем при распаде  $Ni-63$ .
7. Себестоимость производства 12 мг  $C-14$  займет примерно 8 часов, с учетом износа оборудования, обойдется примерно 170\$.

Спасибо за внимание!

N	Количество LiH	Число атомов	Ионный ток, А	$E_{\text{syn}}, \text{J}$	$E_{\text{out}}, \text{J}$
1	$4.516 * 10^{15}$	$7.25 * 10^{-4}$	$6.0 * 10^{-11}$	637	12500
2	$9.033 * 10^{15}$	$1.45 * 10^{-3}$	$1.2 * 10^{-10}$	1274	25000
3	$1.8066 * 10^{16}$	$2.9 * 10^{-3}$	$2.4 * 10^{-10}$	2548	50000
4	$3.613 * 10^{16}$	$5.8 * 10^{-3}$	$4.8 * 10^{-10}$	5096	100000
5	$7.226 * 10^{16}$	$11.6 * 10^{-3}$	$9.6 * 10^{-10}$	10190	200000