

УДК 621.384.6.

Источники нейтронов для нейтронных генераторов

Мороз В.А., к.т.н., доц. Цибульский Л.Ю.

Введение

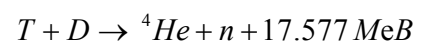
Разработка сравнительно простых способов получения потоков быстрых нейтронов открыла большие возможности применения их в различных отраслях науки и техники. Элементный анализ состава вещества в исследовательских институтах, а также непосредственно в цехах производственных предприятий; каротаж нефтяных, газовых и рудных месторождений; исследования ядерных энергетических реакторов, и термоядерных установок; определение естественных и искусственных нейтронных аномалий; определения влажности почв - вот далеко не полный перечень областей применения нейтронов и их генераторов в настоящее время. В работе рассмотрены основные физико-химические процессы образования быстрых нейтронов и приведены последние технические решения о состоянии источников ионов для нейтронных генераторов.

Физическая основа генерации нейтронного пучка

Действие источников и генераторов нейтронов основано на реализации ядерных реакций, приводящих к выпуску нейтронов. При бомбардировке заряженными

частицами мишеней, выполненных из легких элементов, образуются потоки, как правило, быстрых нейтронов. Потоки нейтронов можно получить и при использовании ядерного фотоэффекта. Процесс деления тяжелых ядер также позволяет получать нейтроны с энергетическим спектром до 15 МэВ. Однако для практических целей получения потоков нейтронов удобные реакции только с некоторыми элементами.

Наибольшее распространение в генераторах нейтронов получила ядерная реакция, происходит при бомбардировке дейтронами мишени, насыщенной тритием:



Эта реакция - экзотермическая и может протекать при сколь угодно малых энергиях дейтронов. Зависимость полного сечения реакции, в 10^{-24} см^2 , от энергии дейтронов E_d , кэВ, в пределах до 300 кэВ [1].

Для эффективной ионизации плотность электронов должна быть достаточно высокой, чтобы могло происходить множество столкновений электронов с нейтральными атомами. Поскольку сечение ионизации зависит от энергии таким образом, что при

превышении некоторого порога сечение уменьшается с дальнейшим ростом энергии, то температура электронной компоненты не должна быть чрезмерно высокой. Значительно более эффективно использовать повторное использование одних и тех же электронов, а не выбивание новых из нейтральных атомов с последующим их нагревом. Принято называть горячие электроны, которые осуществляют ионизацию, первичными, а холодные, образующиеся наряду с положительными ионами при столкновениях, вторичными. Сохранить первичные электроны можно следующими способами:

- Электроны удерживаются аксиальным магнитным полем, отражаясь от отрицательно заряженных электродов. Такой тип разряда называют рефлексивным. Это движение представляет собой колебание электронов в потенциальной яме, созданной заряженными электродами, вдоль силовых линий магнитного поля.
- Электроны могут удерживаться магнитным зеркалом.
- Может использоваться мультипольное магнитное поле для формирования магнитного барьера, окружающего плазменный разряд.

Процесс извлечения связан в основном с приложением высокого напряжения между резервуаром ионов и ускоряющим электродом с отверстием. На траектории ускоряемых ионов, которые непосредственно определяют качество

пучка, влияет несколько факторов, в том числе напряженность приложенного поля, форма эмитирующей поверхности, которая может быть твердой (источники с поверхностной ионизацией) или подвижной (плазменные источники), плотность пространственного заряда пучка. В случае плазменных источников эмитирующая поверхность обычно называется мениском, конкретная форма которого зависит от распределения электрического поля, обусловленного граничными условиями.

Необходимые требования к источникам

Для генераторов чаще всего требуются сильноточные источники, рассматриваемые далее, они имеют следующие особенности: ионы создаются посредством ионизации газа электронным ударом, образуя плазму; плазма имеет значительную ширину 1-10см; электронная плотность порядка 10^{13} см⁻³ и однородна в той части плазмы, из которой происходит экстракция; ионная температура обычно значительно ниже 1эВ. Довольно часто используются разряды поддерживаемые термоэлектронным катодом. Во всех современных источниках используются магнитные поля, чтобы ограничить область плазмы и увеличить степень ионизации на один электрон. Удержание плазмы может быть достигнуто, если линии магнитного поля удалены от области с наивысшей плотностью плазмы, в центре

разрядной камеры значении магнитной индукции минимально.

Источник Пеннинга

Примером очень простого, а потому надежного, источника является так называемый источник Пеннинга² (рис.1) Этот источник оборудован постоянными магнитами в виде стержней, которые расположены вокруг цилиндрического анода и создают осевое магнитное поле, силовые линии которого расходятся от полюсного наконечника (находится вблизи катода) к наружной части источника на стороне вытягивающего электрода.

Фокусирующий электрод δ действует как вытягивающий электрод.

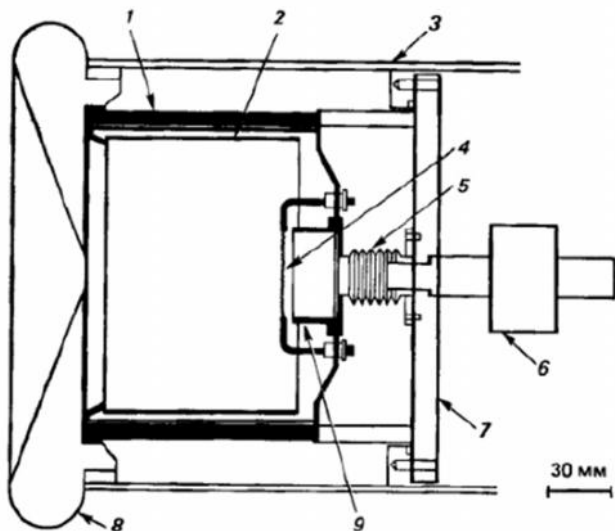


Рис.1. Источник Пеннинга. 1 – корпус магнита, 2 – анод, 3 – несущая трубка, 4 – катод, 5 – сильфон, 6 – газовый клапан, 7 – фланец, 8 – фокусирующий электрод, 9 – полюсный наконечник магнита

Источником многозарядных ионов являются разновидности ячеек

Пеннинга с подогревным катодом, состоящих из разрядной камеры, корпус которой представляет из себя катод. Удлиненного катода трубчатой формы и отражателя быстрых электронов, столкновение с которыми повышает зарядность ионов. Вследствие отражений в ячейке существует осциллирующий электронный пучок, движущийся в продольном магнитном поле с числом осцилляций около сотни. Продольное магнитное поле не позволяет пучку электронов расходиться. Время удержания ионов в источнике Пеннинга мало, составляет около 10 мкс, срок службы около 24 ч.

Напряжение разрядки 1-6 кВ, разрядный ток 1-20 мА, магнитное поле 0.5-1.5 Тл, давление 10^{-3} - 10^{-4} Торр. Обычно используется для получения малозарядных ионов, что связано с резким уменьшением тока ионов при увеличении их зарядности: 1^{+} от 100 мкА до 1 мА; 2^{+} от 1 мкА до 100 мкА и 3^{+} от 100 нА до мкА [2].

СВЧ источник

Источники ионов, в которых плазму получают посредством сверхвысокочастотного разряда в магнитном поле называют СВЧ-источниками. В соответствии с условиями работы и назначением источники данного типа можно разделить на два класса. В источниках одного класса, действующих на электронно-циклотронном резонансе, получают многозарядные ионы, а в источниках другого класса используется нерезонансная СВЧ плазма для получения сильноточных

пучков однозарядных ионов. В общем случае плотность тока выводимых ионов пропорциональна произведению плотности числа электронов на квадратный корень из их температуры. Следовательно, для достижения больших токов, нужно увеличивать один или оба этих параметров. СВЧ ионные источники отличаются от радиочастотных ионных источников более высокой частотой. Вследствие чего ионы плазмы в среднем не ускоряются электрическим СВЧ полем и получается малый разброс пучка ионов по энергиям. Высокочастотные источники (рис.2) предназначены для получения легких ионов путем объемной ионизации газов требуемых элементов. Плазма генерируется высокочастотным электромагнитным полем (10-30 МГц) с мощностью порядка 100 Вт в газе, находящемся под давлением примерно 10^{-3} - 10^{-2} Торр. ЭМ мощность подается или индуктивно (источник помещается в катушку), или через электроды, введенные в объем источника. Позволяет получать токи 1-20 мА, но обладают большим энергетическим разбросом 100 эВ.

Лазерный источник

Лазерный ионный источник – широкий термин, например, его используют для описания применения лазеров при избирательной фотоионизации нужных частиц из смеси атомов путем резонансного возбуждения. Однако наиболее широко даны термин употребляется при описании генерирования и вытягивания ионов, созданных

воздействием лазера большой мощности на твердые тела. Лазерный луч большой мощности, сфокусированный на поверхности твердой мишени, при плотности мощности более 10^8 Вт/см² будет проходить через поверхность, где плотность электронов низка, и распространяться до тех пор, пока электронная плазменная частота не станет соответствовать частоте лазера. При достижении этого условия происходит быстрый электронный нагрев и интенсивная ионизация, создается плотная горячая плазма. Материал мишени «взрывается», образуя чрезвычайно плотную плазменную струю, распространяющуюся в направлении наибольшего градиента гидродинамического давления, обычно перпендикулярно поверхности.

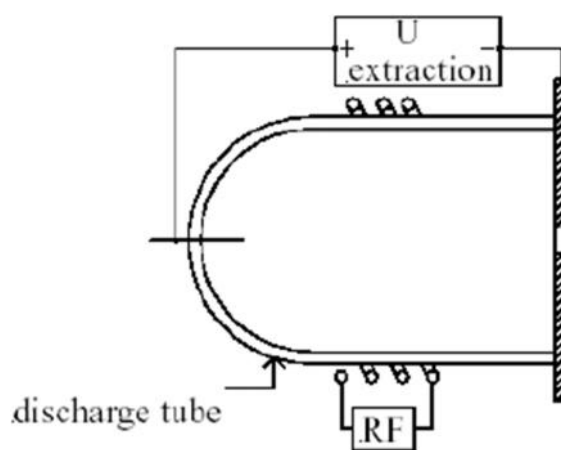


Рис. 2. ВЧ-источник

Потенциально полезными свойствами для ионных источников плазменных выбросов являются: 1) значительное количество ионов в выбросе; 2) высокая степень ионизации; 3) короткое время

генерирования плазмы; 4) направленность плазменных выбросов (их можно ориентировать вдоль оси вытягивания, что приведет к малым эмиттансам пучка); 5) возможность создания разнообразных ядерных частиц, потенциальным источником плазмы является любой твердый материал; 6) простота проектирования и изготовления; 7) отсутствие газ-носителя. В варианте установки, используемой в Дубне (Рис. 3), плазма, создаваемая лазером, выбрасывается параллельно направлению магнитного поля и сжимается последним в шнур, распространяющийся поперек анода, в котором имеется щель, ширина которой больше диаметра плазменного шнура [3].

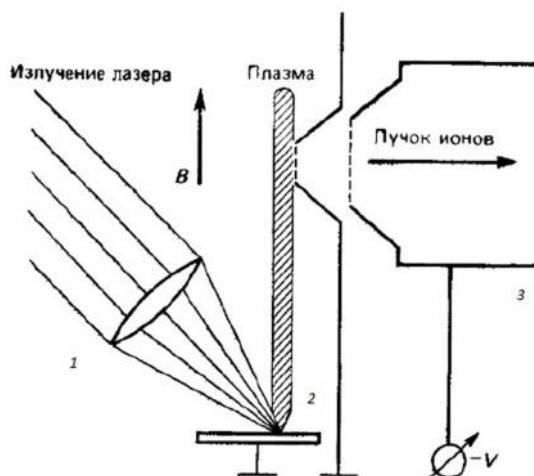


Рис. 3 Лазерный источник

1) Линза 2) Мишень 3) Извлекающая система

Выводы

Современное состояние нейтронных генераторов имеет

широкую перспективу в развитии, так как комбинирование разнообразных способов и методов получения потока нейтронов лишь повышает коэффициент полезного действия.

Для более простого и надежного исполнения из ряда всех существующих источников обратить внимание необходимо на источник Пеннинга, так как за результатами он имеет самое больше КПД порядка 38%, конструктивно прост и в исполнении, однако необходимо также учесть и область применение, так для научного точного анализа уместным будет применение лазерного источника, а для каротажа источник Пеннинга

Таким образом поставается задача получить модель плазменного источника на более простой модели для подтверждения этой гипотезы.

Литература

1. Кертис Л. «Введение в нейтронную физику». – М.: Атомиздат. 1965. 352с.
2. Кирьянов Г.И. «Генераторы быстрых нейтронов». – М.: Энергоатомиздат. 1990. – 224 с.
3. Juan M., David Schmale, Mike Cich, «Novel Surface-Mounted Neutron Generator», *IEEE transactions on plasma science*, vol. 40, no. 9, pp.2145-2150, sept 2012