РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



ПРЕПРИНТА.В. АГАФОНОВ, Е.Г. КРАСТЕЛЕВ30Системы симметричного
питания для приборов
релятивистской электроники

MOCKBA 2005

Аннотация

А.В.Агафонов и Е.Г.Крастелев

Системы симметричного питания для приборов релятивистской электроники

С эффективности целью увеличения релятивистских магнетронов предложена новая схема симметричного питания. Одной из существенных причин, влияющих на эффективность релятивистских магнетронов, является схема питания магнетрона с одной стороны. В такой схеме возникает дрейф электронов в аксиальном направлении с генерацией паразитного пучка, не участвующего в обмене энергией с волнами, поперечные скорости электронов трансформируются в продольные. Предложена схема специального модулятора, обеспечивающего симметричное питание релятивистских магнетронов и отличающегося компактностью и надежностью работы при высокой частоте следования импульсов. Представлены результаты разработки двух вариантов генератора мощных наносекундных импульсов для питания специализированного двухсекционного ЛИУ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 03-02-17300.

Abstract

A.V.Agafonov and E.G.Krastelev

Symmetric Powering System for Relativistic Electronic Devices

A new scheme of a symmetrically powered relativistic magnetron is proposed to increase the efficiency of relativistic magnetrons. As will be shown, a very important reason is the effect of non-symmetric feeding of power from one side of a magnetron, which is typical for experiments. One-sided powering leads to the axial drift of electrons, to the transformation of transverse velocities of electrons to a longitudinal one and to the generation of a parasitic e-beam which does not take part in energy exchange between electrons and waves at all. A special driver was designed for double-sided powering of relativistic magnetrons. It consists of two identical sets of induction modules (two sections of LIA) with inner electrodes - vacuum adders connected to both sides of a coaxial magnetron. For this setup the full voltage appears in the magnetron region only between the inner and outer coaxial electrodes (at the output of the sections). All modules are powered from a common pulse power generator or in pairs using several synchronized pulse generators to provide identical parameters of the output pulses for both section and symmetric power flowing in a magnetron. The proposed system is compact, rigid and capable of reliable operation at high repetition rates, which is advantageous for many applications. Two prototypes of pulsed power generators for a two-sectional LIA – specialized driver of a relativistic magnetron were constructed and tested.

Work supported by RFFI under grant 03-02-17300.

Введение

В работах [1, 2] была предложена новая схема симметричного питания релятивистского магнетрона, которая позволяет локализовать эмитируемый катодом электронный поток в пространстве взаимодействия магнетрона и тем самым повысить эффективность преобразования энергии. Она устраняет наиболее существенные недостатки традиционной схемы одностороннего питания релятивистского магнетрона, проявляющиеся в дрейфе электронов в направлении c трансформацией поперечных аксиальном скоростей В продольные и генерации паразитного пучка с торца катода, не участвующего в обмене энергией с волнами. Для симметричного ввода мощности питания в магнетрон было предложено использовать две одинаковые секции линейного индукционного ускорителя (ЛИУ), располагаемые с обеих сторон магнетрона и объединенные с ним в единую систему с помощью общего центрального электрода - сумматора, проходящего через всю систему и закрепленного на заземленных фланцах по концам секций ЛИУ. Напряжение на этом электроде ступенчато возрастает от нуля у заземленных торцов до максимального, равного сумме напряжений всех индукторов одной секции, в области магнетрона, в которой на нем располагается эмитирующая вставка – катод магнетрона. Как показывают результаты численного моделирования, частично представленные в работах [1, 2], эмитируемый с ее поверхности электронный поток может быть локализован в пространстве взаимодействия магнетрона путем использования дополнительных электростатических зеркал или магнитных пробок с обеих сторон от катодной вставки. Изменение конфигурации магнитного поля и/или формы формировать желаемую конфигурацию электродов позволяет электронного потока.

Реализация предложенной схемы симметричного питания релятивистского магнетрона требует создания специализированной установки, интегрирующей в единое целое собственно магнетрон с элементами формирования локализованного электронного потока и две одинаковые секции ЛИУ с общим штоком-сумматором.

Такая установка обладает всеми достоинствами схемы ЛИУ с сумматором, к которым относятся высокая эффективность передачи энергии от генератора в нагрузку, отсутствие изолятора на полное напряжение, возможность использования сравнительно невысоких напряжений возбуждения индукторов и, соответственно, питающих их генераторов импульсов. Отметим, что для

обеспечения симметрии подвода мощности к магнетрону питание индукторов секций должно осуществляться от одного общего генератора импульсов либо попарно от нескольких генераторов. В последнем случае к каждому из генераторов подключаются пары параллельно соединенных индукторов левой и правой секции.

Немаловажным достоинством установки с практической точки зрения является возможность ее выполнения в виде функционально законченных блоков генератора импульсов и индукторов ЛИУ. Схемные и конструктивные решения этих узлов, а также число индукторов в секциях могут изменяться в зависимости от решаемых задач, что представляет определенную гибкость в проведении исследований.

Высокий КПД обычных магнетронов был достигнут в результате интенсивных экспериментальных и теоретических исследований, направленных на оптимизацию всех основных его узлов. Разработки же релятивистских магнетронов, несмотря на более чем двадцатилетнюю историю, не вышли из стадии Действительно, начальной развития. подавляющее большинство опубликованных в печати работ носит, прежде всего, характер демонстрации возможности создания релятивистских магнетронов самой экстремально высокой мощности [3-5]. Весьма показательным с этой точки зрения является то, что эти эксперименты выполнены не на специально созданных установках, а на существовавших в лабораториях сильноточных ускорителях. Собственно магнетронный генератор тем или иным способом приспосабливался к существующим элементам конструкции диода ускорителя, в результате чего сам магнетрон выглядит уже неким чужеродным довеском BO всей этой конструкции. Тем не менее, полученные в экспериментах на сильноточных ускорителях беспрецедентные уровни мощности СВЧ-излучения - от сотен мегаватт до нескольких гигаватт, привлекают пристальное внимание многих потенциальных потребителей и служат хорошим основанием для продолжения и развития работ по релятивистским магнетронам.

Хотя качественное описание принципа работы магнетрона известно давно, строгой теории с подробным количественным анализом динамики частиц с учетом такого важного фактора как пространственный заряд, до сих пор не существует. Это объясняется в первую очередь сильной нелинейностью и многомерным характером взаимодействия частиц с волной, а также рядом вопросов, связанных с нестационарным режимом работы. Следует напомнить, что до сих пор отсутствует удовлетворительное решение задачи даже для

магнетрона со сплошным анодом (анод без резонансной структуры). И все же, несмотря на отсутствие теоретического понимания, благодаря непрерывным экспериментальным исследованиям было разработано внушительное семейство магнетронов для самых различных применений. Подходы к решению этой задачи подробно рассмотрены в монографии "Магнетроны сантиметрового диапазона" [6].

В случае релятивистских магнетронов физическая картина усложняется из-за трансформации двумерной нелинейной картины взаимодействия в трехмерную, существенного влияния краевых эффектов, а также, не в последнюю, очередь, использованием в качестве драйверов приспособленных, но не специализированных, установок.

Экспериментальные исследования по релятивистским магнетронам

Магнетроны являются одним из старейших СВЧ-устройств, обладающих высокой эффективностью (до 80% на частоте 2,45 ГГц), однако, в силу сложности их геометрии и того, что они относятся к т.н. классу устройств со скрещенными полями, их возможности изучены не полностью. Существуют обзоры по теории релятивистских магнетронов и экспериментальным исследованием [6, 7]. По своему принципу работа магнетронов отличается от всех ВЧ-устройств в том, что в ВЧ-излучение конвертируется потенциальная энергия частиц, чем и обуславливается его высокая эффективность.

Экспериментальные исследования сильноточных релятивистских магнетронов ведутся давно, что позволяет оглянуться назад и попытаться понять, что же существенного произошло, и произошло ли. Однозначного ответа на этот вопрос нет. Эксперименты проведены практически всеми ведущими лабораториями, связанными с сильноточной тематикой. Получены, в общем, неплохие результаты с оптимистическими прогнозами на их дальнейшее развитие. Легко прослеживаются усилия, направленные на повышение эффективности приборов путем подавления краевых эффектов (изменение конфигурации магнитного поля и введение краевых пробок) и путем модификации катодных узлов, на совершенствование методов вывода излучения экстремально высокой мощности и его диагностики.

Эксперименты по релятивистским магнетронам проводились в США в Physics International Corp. [4, 9], в МІТ [10], в ФИАНе [11, 12] и др. [13]. В совместных работах ИПФ и ФИАНа рекордная мощность излучения 3 ГВт на

длине волны 3 см была получена еще в 1979 г. В МІТ использовался 6резонаторный магнетрон, дающий до 900 МВт мощности на частоте 4,6 ГГц. Длительность ВЧ- импульса составляла около 20 нс и была примерно вдвое короче импульса напряжения (40 нс), прикладываемого к магнетрону от формирующей линии. (Как уже отмечалось, для генерации мощного ВЧизлучения в качестве драйверов часто используются сильноточные ускорители прямого действия).

Эксперименты в PIC на магнетроне S-диапазона велись на несколько большем генераторе (ускорителе) и, соответственно, при большей мощности. При выводе излучения из одного резонатора пиковая мощность достигала 1,5 ГВт. Максимум мощности в 3 ГВт достигался при выводе ее одновременно из трех резонаторов. С увеличением числа выводов мощность падает из-за ее зависимости от добротности резонатора. Максимальная эффективность релятивистского магнетрона в PIC составляла около 20%, т.е. существенно меньше, чем в обычных низковольтных магнетронах.

Таким образом, за 20 лет были получены весьма впечатляющие результаты. С другой стороны, схема постановки экспериментов, да и решение вопроса о стыковке с генератором импульсов высокого напряжения остались почти неизменными. Это касается и вопроса согласования исследуемого ВЧприбора с питающим генератором. По-прежнему, эксперименты ведутся на неспециализированных для этих целей сильноточных ускорителях, так или иначе приспособленных под эксперименты с той же характерной особенностью первых работ, что сам магнетрон является неким дополнением (довеском) диода ускорителя. По-прежнему, чтобы приблизиться к желаемому диапазону токов и дополнительные (шунтирующие) напряжений устанавливаются диодные промежутки, генерирующие паразитные пучки И вносящие только дополнительные трудности независимо от того какая бы база под них подводилась - стабилизация напряжения или нагрузки генератора или какая результате "согласованного" действия экспериментаторов и иная. В Α теоретиков из расчетов исчезает тонкая ниточка связи характеристик магнетрона и параметров генератора импульсов.

Тем не менее, именно этими усилиями подготовлена хорошая база для следующего шага - создания специализированной интегрированной системы. В данной работе акцентируется внимание на актуальности этого шага и необходимости сделать его сейчас, когда все необходимые предпосылки уже имеются.

Возможность реализации изложенной выше идеи двухстороннего питания релятивистского магнетрона не вызывает принципиальных возражении - надо только подвести импульсы высокого напряжения к катоду с двух сторон. Однако ее техническое воплощение не столь просто. Более того, для большинства лабораторных сильноточных существующих ускорителей оно И не представляется возможным, ибо они просто не годятся для этого. Рассчитанные на генерацию электронных или ионных пучков они имеют односторонний ввод мощности (ускоряющего напряжения) в диод, оставляя другую сторону открытой для пучка. Такое положение вещей естественным образом вытекает из логики построения таких машин: последовательной компрессии энергии с перекачкой ее из медленного накопителя в более быстрые секции, в качестве которых наиболее часто используются коаксиальные линии. Диодная или иная ускоряющая структура, установленная на конце последней секции является логическим завершением этой цепочки. В итоге энергия течет в одну сторону, частицы. Эта ускоряя желаемые ИЛИ нежелаемые проблема увлекая, несимметричного подвода энергии очень остра для целого ряда исследовании, в частности, УТС. В последнем случае ее решение было найдено в виде... многомодульных установок симметричных co сведением энергии В симметричные диодные структуры тем или иным методом.

Численное моделирование

Предложенная выше идея симметричного питания магнетрона достаточно ясна и прозрачна. Следует отметить, что те или иные попытки локализации потока в области взаимодействия предпринимались как раз с целью увеличения эффективности преобразования энергии пучка в энергию ВЧ-поля. Для этого применялись магнитные пробки, которые должны были обеспечить запирание пучка в области взаимодействия, либо профилирование электродов, которое формировало электростатические зеркала на границах области взаимодействия. Однако, применение только запирания пучка без симметризации питания магнетрона не позволяло получить желаемый результат. Попытаемся вначале описать не столько физическую картину происходящего при формировании электронного потока в магнетроне с гладким анодом или, проще говоря, в магнетронной пушке, сколько проблемы, которые при этом возникают. Экспериментальные исследования с релятивистскими магнетронами проводились, исходя из существовавших теоретических моделей формирования

электронных потоков в сильноточных диодах. Парадоксальность ситуации заключается в том, что теоретические модели довольно правильно описывали ситуацию, характерную для проводимых исследований, т.е. для случая питания диода с одной стороны с выносом пучка из области радиального ускоряющего промежутка. Т.е. основным назначением генератора было не получение пучка, с параметрами наиболее подходящими для генерации ВЧ-излучения в ограниченной области, а формирование пучка "на вынос" таким, как он получается.

Поскольку в экспериментах с мощными релятивистскими магнетронами использовались, как правило, взрывоэмиссионные катоды, это давало право утверждать, что ток пучка в таких диодах ограничен пространственным зарядом и равен предельному току Чайльда-Ленгмюра. Напомним несколько принципиальных моментов, которые, как правило, молчаливо обходятся в теоретических построениях, но присутствуют в эксперименте:

• импульс напряжения, подаваемый на диод, имеет, как правило, колоколообразную форму с довольно большим (десятки наносекунд) временем нарастания;

• генератор импульсов представляет собой внешнюю по отношению к диоду цепь, которая грузится током формируемого пучка;

• в магнетронах используются коаксиальные диоды с магнитной изоляцией, т.е. устройства со скрещенными электрическими и магнитными полями.

Сочетание трех отмеченных выше факторов (нестационарность напряжения, существование внешней цепи, наличие скрещенных полей) приводит в случае запирания пучка в области его формирования (в том числе и при симметричном питании) к картине, отличающейся от привычной для формирования пучка, транспортируемого из диода. Во-первых, рост напряжения на коаксиальном диоде ведет к очевидному эффекту: захвату эмитированных электронов внутри ускоряющего промежутка. В обычном варианте электроны выносятся из ускоряющего промежутка, по катодному штоку протекает аксиальный ток, формирующий азимутальное магнитное поле, вызывающее дрейф электронов в направлении потока энергии. До тех пор, пока напряжение нарастает, возможно, накопление заряда внутри ускоряющего промежутка, пока он не превысит предельное значение, при котором нормальная составляющая электрического поля на эмитирующей поверхности станет равной нулю. Именно такая ситуация дословно соответствует ограничению тока пространственным

зарядом с эмитирующей поверхности: ток эмиссии с поверхности отсутствует, она не может больше эмитировать электроны, хотя и обладает неограниченной эмиссионной способностью. При этом электроны в потоке, сформированном внутри ускоряющего промежутка, движутся отнюдь не по циклоидальным траекториям, которые привычно видеть на всех иллюстрациях к работе диодов с магнитной изоляцией и линий с магнитной изоляцией, а вращаются вокруг катода, а сам поток напоминает по своей структуре бриллюэновский. Естественно, что такой поток не может быть однороден ни в азимутальном, ни в аксиальном направлении, поскольку любые возмущения плотности заряда внутри ускоряющего промежутка вызывают неоднородность тока эмиссии - т.е. в такой ситуации характерной особенностью является наличие обратной связи. Эти неоднородности усугубляются несимметрией питания с одной стороны диода, подсадкой напряжения и др.

Таким образом, в случае запирания электронного потока в ограниченной области, в которой он магнитно изолирован, по крайней мере, в начальные моменты времени, картина потока кардинально отличается от общепринятой для устройств с магнитной изоляцией. До тех пор, пока из сформированного потока не возникнет отток электронов на анод (например, за счет собственных азимутальных неустойчивостей, или за счет возбуждения медленной волны в магнетроне с анодными резонаторами), катод тока не отдает. В дальнейшем с выходом на какой то установившийся режим с катода будет сниматься только то значение тока, которое будет восполнять недостаток до предельного заряда в ускоряющем промежутке.

Проиллюстрируем теперь приведенное выше описание результатами численного моделирования для простейших геометрий. Расчеты динамики формирования пучка проведены по 2,5-мерному электромагнитному коду КАРАТ [15] для азимутально симметричных систем. Подчеркнем, что ограничение системами с азимутальной симметрией означает, что возможные азимутальные неустойчивости пучка не рассматриваются. На Рис. 1 показана обычная схема формирования электронного пучка в диоде с магнитной изоляцией.

На диод, находящийся в достаточно сильном продольном магнитном поле, подается высокое напряжение, под действием которого на поверхности катода формируется взрывоэмиссионная плазма, из которой вытягивается электронный пучок. На Рис. 2 приведены конфигурации электронных потоков внутри коаксиальных диодов с эмитирующими вставками при условии симметричного

(слева) и несимметричного (справа) питания. В последнем случае высоковольтный импульс запускался с левой стороны диода. Диоды находятся в



однородном продольном внешнем магнитном поле 8 кГс, максимальное напряжение 500 кВ, длительность нарастания напряжения до максимального значения 2 нс, максимальный ток с эмитирующей вставки 10 кА. В случае симметричного питания ток равномерно делится по двум направлениям, и двойной пучок выносится из области формирования. При несимметричном питании величина тока в направлении потока энергии превышает ток пучка, текущего в противоположном направлении.



Рис. 2.

Рис. З иллюстрирует два возможных метода локализации электронного потока в пределах некоторой области взаимодействия. На левом рисунке показана конфигурация электронного потока при симметричном питании при наличии магнитных пробок с максимальным значением поля 11 кГс справа и слева от эмитирующей вставки, на правом рисунке для формирования ограниченного потока использованы электростатические зеркала, формируемые искривленными электродами. В обоих случаях в пределах области взаимодействия магнитное поле составляет 8 кГс.



Рис. 3

Изменение конфигурации магнитного поля и/или формы электродов формировать желаемую конфигурацию позволяет электронного потока. Сравнение характеристик потоков внутри диодов с магнитными И электростатическими пробками показывает, что схема с электростатическими зеркалами может быть предпочтительнее для использования в релятивистских магнетронах. Зависимости $p_{\theta}(r)$ частиц («фазовые портреты») в потоке для этих случаев показано на Рис. 4 (слева при наличии магнитных пробок, справа – электростатических).



Рис. 4

Индукционный драйвер релятивистского магнетрона

Собственно драйвер

Симметричный ввод энергии в релятивистский магнетрон с двух сторон можно осуществить различными путями, используя, например, на выходе генератора специальный тройник-разветвитель или два синхронно включаемых сильноточных ускорителя. Однако наиболее естественно это достигается при использовании рассмотренного ниже специализированного симметричного индукционного драйвера, который в наибольшей мере отвечает предложенной идее двустороннего питания. Принципиальная схема предлагаемого драйвера вместе с условным изображением одного из возможных вариантов магнетрона показана на Рис. 5.



Рис. 5. Схематическое изображение драйвера, обеспечивающего симметричное питание интегрированного в конструкцию магнетрона. 1, 2 – секции ЛИУ, 3 – область взаимодействия пучка (магнетрон).

Драйвер состоит из двух одинаковых секций линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) (области 1 и 2), установленных с обеих сторон магнетрона (область 3) и объединенных с ним общим центральным электродом сумматором напряжении. Оба конца этого электрода соединены с заземленными фланцами на концах секций ЛИУ, а середина его выполняет роль катода магнетрона. В пределах каждой из секций центральный электрод суммирует напряжения, развиваемые отдельными индукторами, входящими в состав секции. Это напряжение ступенчато возрастает от нуля у заземленных торцов до максимального, равного сумме напряжении всех индукторов одной секции, действующего только на выходе секции, т.е. в области магнетрона.

В случае использования одинаковых секции, имеющих одинаковое число индукторов, которые запитываются от одного общего генератора импульсов, или попарно от нескольких, суммируемые напряжения будут равны, как и равны потоки энергии, втекающие в магнетрон слева и справа.

Собственно магнетронный генератор, схематично изображенный на Рис. 5, состоит из центрального электрода - катода, роль которого может выполнять наиболее напряженный участок посередине штока-сумматора или установленный на нем специальный электрод заданного диаметра ИЛИ изготовленный ИЗ другого материала, коаксиального с НИМ анодного резонаторного блока и устройства вывода ВЧ-мощности. Вывод мощности осуществляется с помощью нескольких радиально расположенных волноводов через щели в резонаторах анодного блока и установленные сразу за ними короткие согласующие секции - трансформаторы импедансов. Такая схема вывода мощности, типичная для классических низковольтных магнетронов была успешно применена в экспериментах с релятивистскими магнетронами высокой импульсной мощности, выполненными в работах [3, 14].

Достоинства предлагаемого драйвера определяются, прежде всего, достоинствами схемы ЛИУ с сумматором напряжении набора индукторов, которая в последние годы получила интенсивное развитие и широко используется в технике сильноточных ускорителей, начиная от сравнительно небольших установок, до самых высоковольтных и мощных машин [15, 16]. При высоких напряжениях, неизбежно сопровождающихся неконтролируемой эмиссией электронов с поверхности штока-сумматора, магнитная самоизоляция предотвращает паразитные токи утечки электронов на внутренние стенки индукторов. Для согласования условий магнитной самоизоляции на всем протяжении штока при ступенчато нарастающем вдоль системы напряжении диаметр штока-сумматора может варьироваться в соответствие с изменением напряжения. Подобная схема была с успехом использована в упомянутой выше работе [14] для создания специализированного, но одностороннего драйвера для релятивистского магнетрона.

К несомненным достоинствам схемы ЛИУ с вакуумным сумматором относятся высокая эффективность передачи энергии от генератора в нагрузку, отсутствие изолятора на полное напряжение, возможности использования сравнительно невысоких напряжения возбуждения отдельных индукторов и, соответственно, питающих их генераторов импульсов.

Для предлагаемого драйвера следует еще добавить и высокую степень симметрии подвода мощности к магнетрону. Достигается это, как отмечалось, питанием всех индукторов либо от одного общего генератора, либо попарно от нескольких генераторов. В последнем случае к каждому из генераторов подключены пары параллельно соединенных индукторов левой и правой секции. Программное управление последовательностью включения отдельных генераторов позволяет, в принципе, ступенчато контролировать результирующее напряжение на магнетроне; кроме того, один из генераторов с управляемым выходным напряжением может быть использован для тонкой коррекции формы и амплитуды выходного напряжения.

Использование нескольких индукторов позволяет формировать профиль изменения напряжения на магнетроне. Подход, при котором возбуждение индукторов осуществляется с некоторой задержкой, позволяет формировать

результирующий импульс напряжения с плоской вершиной, может оказаться весьма плодотворным для ВЧ-генераторов, где эта проблема существует уже давно. Данный подход опробован на линейном индукционном ускорителе ЕТА-II, где удалось сформировать пучок с плоской вершиной по энергии длительностью около 40 нс [15].

Удвоение числа индукторов в предлагаемой схеме по сравнению со схемой одностороннего питания магнетрона от одной секций ЛИУ на то же напряжение ведет к увеличению габаритов системы, ее удорожанию и требует величину увеличения мощности генератора импульсов на потерь на перемагничивание дополнительных сердечников. Однако увеличение эффективности генерации ВЧ-мощности лихвой может С окупить дополнительные затраты и компенсировать эти потери.

Немаловажным достоинством предлагаемой схемы симметричного питания с точки зрения практической реализации является возможность ее выполнения в виде функционально законченных блоков генератора импульсов и секций ЛИУ, которые, в свою очередь, могут быть выполнены в виде набора одинаковых модулей – индукторов. Схемные и конструктивные решения этих узлов, а также число индукторов в секциях могут меняться в зависимости от решаемых задач, что предоставляет определенную гибкость в использовании данной системы.

Модульная экспериментальная установка

Примером конструкции симметричного индукционного драйвера и системы его питания может служить модульная установка лабораторного масштаба, разработанная для экспериментальных исследований по формированию локализованного электронного потока в пространстве взаимодействия магнетрона с двусторонним питанием. Основные параметры установки следующие:

• амплитуда суммарного напряжения до 250 кВ (в режиме одиночных импульсов - до 300) на нагрузке 25-50 Ом;

- напряжение возбуждения индукторов 50 кВ;
- число индукторов в секции 5;
- длительность импульсов 80 нс;

• максимальная частота повторения импульсов, ограниченная системой питания магнитных катушек и зарядным устройством, до 1 Гц.

Желание создать легко модифицируемую лабораторную установку предопределило выбор сравнительно невысокого напряжения на отдельных индукторах. Это позволяет использовать гибкие стандартные радиочастотные кабели (типа PK-50-9 или PK-50-11) для подвода питания к индукторам и конструктивно разбить установку на несколько функциональных модулей. В зависимости от задач экспериментов число модулей-индукторов в секциях ЛИУ, а также тип и параметры генератора импульсов могут быть изменены.

Секция ЛИУ

Конструкция одной секции модульной установки схематично показана на Рис. 6. Секция состоит из пяти одинаковых модулей-индукторов и торцевого узла крепления и юстировки центрального штока-сумматора. Она стыкуется с короткой переходной секцией, которая непосредственно примыкает к области коаксиального диода с магнитной изоляцией (магнетрона с гладким анодом). Полная длина секции составляет 750 мм, наружный диаметр - 320 мм. Диаметр центрального электрода-сумматора 40 - 60 мм.



Рис. 6: Схема одной секции модульной установки.

Конструкция и размеры индукторов выбраны, исходя из использования в каждом из них доступных высококачественных кольцевых сердечников из аморфного металла (сплав 30КСР) с межслойной полимерной изоляцией. В каждом из них используются по два сердечника, имеющие следующие размеры:

• внутренний диаметр - 110 мм;

- внешний до 300 мм;
- толщина 20 мм.

При напряжении возбуждения 50 кВ и расчетной длительности импульса 80 нс максимальное изменение индукции в сердечниках не превышает 2,4 Тл, что почти на 20% ниже удвоенной индукции насыщения с учетом технологического разброса параметров сердечников. Сердечники и кабельные объеме, заполненном вводы напряжения находятся В изолирующим трансформаторным маслом. Кольцевой изолятор, отделяющий масло от вакуумной области индуктора, изготовлен из оргстекла толщиной 1,5 см и имеет скошенную под углом 45 градусов обращенную внутрь поверхность.

Для уменьшения веса и облегчения изготовления все металлические детали индукторов выполнены из алюминия. Детали переходной секции, которая с одной стороны магнетрона используется как диагностическая и откачная, а с другой - только как диагностическая, изготовлены из нержавеющей стали для уменьшения возмущений импульсного магнитного поля в области магнетрона. Массивный алюминиевый фланец первого индуктора наоборот, препятствует проникновению магнитного поля в секцию ЛИУ и снижает вероятность попадания электронов на высоковольтные изоляторы. Центровка магнетронного узла осуществляется с помощью юстировочных винтов по краям центрального штока и контролируется через окна в переходных секциях.

Системы импульсного питания двухсекционного ЛИУ – драйвера релятивистского магнетрона.

Ниже представлены результаты разработки двух вариантов генератора мощных наносекундных импульсов для питания специализированного двухсекционного ЛИУ – драйвера релятивистского магнетрона [16-19].

Первый из них предназначен для возбуждения индукторов лабораторной модульной установки, создаваемой для исследований по формированию локализованного электронного потока в коаксиальном диоде с двухсторонним симметричным питанием. Генератор обеспечивает получение на согласованной нагрузке суммарным сопротивлением 2 Ома импульсов с амплитудой напряжения до 50 кВ и длительностью по основанию около 100 нс, следующих с частотой повторения до 1 Гц. Генератор выполнен на новых перспективных элементах – конденсаторах-формирователях импульсов, представляющих собой масляно-бумажные конденсаторы с обкладками, выполненными в виде одиночной формирующей линии (ОФЛ). Применение таких конденсаторов

позволяет значительно упростить схему генератора и уменьшить его размеры по сравнению с традиционными решениями.

Второй генератор, проект которого разработан для полномасштабной интегрированной системы симметричного питания релятивистского магнетрона на базе двух секций ЛИУ на напряжение до 1 МВ, построен по традиционной для сильноточных ускорителей схеме. Он включает в себя 4-х каскадный ГИН и две одновременно заряжаемые от него до напряжения 200 кВ формирующие линии С водяной изоляцией, коммутируемые искровыми газовыми разрядниками. Каждая из линий с волновым сопротивлением 2 Ома предназначена для возбуждения до 10 индукторов секций ЛИУ импульсами с амплитудой напряжения 100 кВ, длительностью 80 нс. Испытания макета генератора с одной формирующей линией уменьшенной длины показали возможность его работы с частотой повторения импульсов более 10 Гц.

Генератор на основе конденсаторов-формирующих линий

Конструкция и схемотехнические решения этого генератора основаны на использовании опытных конденсаторов-формирователей квазипрямоугольных импульсов наносекундной длительности, представляющих собой маслянобумажные конденсаторы с обкладками в виде одиночной формирующей линии. Применение таких конденсаторов позволяет значительно упростить схему генератора и уменьшить его размеры по сравнению с традиционными решениями.

Генератор разработан для возбуждения индукторов лабораторной модульной установки, создаваемой для исследований по формированию локализованного электронного потока в коаксиальном диоде с двухсторонним симметричным питанием. Краткое описание проекта этой установки и ее основные ее параметры приведены в предыдущем разделе.

В качестве одной из основных при разработке системы импульсного питания установки рассматривалась задача создания простого по конструкции и легко реализуемого в лабораторных условиях генератора наносекундных импульсов. Одним из возможных решений является его построение по схеме генератора импульсного напряжения (ГИН) с каскадами, выполненными на элементах, объединяющих В себе функции накопителей энергии И формирователей импульсов наносекундной длительности. Такими элементами энергоемкие масляно-бумажные конденсаторы с обкладками. являются выполненными в виде формирующей линии, опытные образцы которых были

разработаны ОКБ «НОВИК» (г.С.-Петербург) в середине 90-х годов. Изготовленные малой партией конденсаторы-формирователи наносекундных импульсов имеют следующие параметры:

- максимальное зарядное напряжение 80 кВ;
- емкость 28 нФ
- волновое сопротивление внутренней ОФЛ 1,7 Ом;
- длительность импульса на согласованной нагрузке 80 нс.

Они смонтированы в пластмассовых прямоугольных корпусах с размерами 30x12x13 см³ и имеют выводы с противоположных сторон корпуса в виде линейки из 6 шпилек M10.

Основываясь на применении таких конденсаторов были разработаны два варианта схемы генератора для питания индукторов лабораторной модульной установки, отличающиеся между собой числом коммутирующих разрядников и величиной зарядного напряжения.

Схема первого варианта генератора показана на Рис.7. Генератор включает в себя две симметрично расположенных цепи формирования импульсов, коммутируемые одним общим газовым разрядником. В каждой из цепей установлено по два последовательно соединенных конденсатора-формирователя, заряжаемых до 50 кВ каждый от общего источника на напряжение 100 кВ. Полное зарядное напряжение подводится к общей точке соединения цепей и коммутирующего разрядника. С помощью резистивных делителей ОНО равномерно распределяется между последовательно включенными конденсаторами-формирователями, выходные клеммы которых BO время зарядки заземлены через индуктивные развязки и дополнительный резистор с малым сопротивлением. При срабатывании разрядника на выходных клеммах появляется импульсное напряжение отрицательной полярности, которое посредством набора коаксиальных кабелей передается к индукторам. Выходной импеданс каждой из двух цепей составляет около 4 Ом с учетом сопротивления многоканального газового разрядника рельсового типа.

Для перемагничивания сердечников между импульсами используется (на схеме не показан) дополнительный низковольтный источник постоянного тока (+V подмагн.), который, подключается к кабельным коллекторам генератора через развязывающие индуктивности (L) и емкостной фильтр.

Для уменьшения величины зарядного напряжения во втором варианте генератора была использована схема двухкаскадного генератора импульсного напряжения (ГИН) с биполярной зарядкой. В каждом из каскадов установлено



Рис. 7: Схема генератора модульной установки.

по два конденсатора-формирователя, заряжаемых до напряжений +50 кВ и – 50 кВ. Для коммутации каскадов используются два управляемых газовых разрядника с электродами ножевого типа. Выходные параметры обоих вариантов генератора аналогичны.

Все элементы генератора, включая выпрямитель зарядного напряжения, низковольтный выпрямитель тока перемагничивания, генератор поджигающих импульсов и цепочки коррекции импульсов размещаются в прямоугольном баке сечением 70×80 см² и высотой 30 см, заполненном трансформаторным маслом.

На рис. 8 показаны осциллограммы импульсов тока и напряжения, полученные на нагрузке, близкой к согласованной, во время макетирования генератора.



Рис.8.

По сравнению с традиционными для сильноточных наносекундных генераторов решениями применение быстрых конденсаторов—формирователей позволяет упростить схему генератора и значительно уменьшить его размеры.

Такой подход был успешно опробован в при создании компактного генератора наносекундных импульсов на напряжение до 400 кВ [20].

Генератор на основе формирующих линий с водяной изоляцией.

Проект экспериментальной интегрированной системы симметричного питания релятивистского магнетрона гигаватного уровня мощности на напряжение до 1 МВ предусматривает использование двух секций ЛИУ, включающих в себя до 10 индукторов в секции. Для их возбуждения необходим генератор, обеспечивающий получение на суммарной эквивалентной нагрузке 1 Ом импульсов длительностью около 80 нс с амплитудой напряжения 100 кВ. Он должен допускать работу, как в режиме генерации одиночных импульсов, так и импульсно-периодическом режиме с частотой повторения импульсов не менее 1 Гц. Кроме того, генератор должен быть легко модифицируем для работы с укороченными секциями с меньшим числом индукторов (до 5 в каждой секции).

На основе анализа возможных вариантов построения, численных расчетов и предварительного макетирования была выбрана традиционная для импульсного питания сильноточных ускорителей схема генератора с первичным емкостным накопителем энергии в виде генератора импульсного напряжения (ГИН) и формирователем наносекундных импульсов на основе низкоомных формирующих линий (ФЛ) с водяной изоляцией.

Генератор включает в себя 4-х каскадный ГИН на напряжение 200 кВ и две одновременно заряжаемые от него коаксиальные ФЛ с водяной изоляцией с волновым сопротивлением 2 Ома, коммутируемые искровыми газовыми разрядниками. С выхода ФЛ импульсы передаются к индукторам с помощью по волновому сопротивлению наборов 10 двух согласованных ИЗ высоковольтных коаксиальных кабелей с импедансом 20 Ом. От каждой из ФЛ кабели разводятся попарно на индукторы обеих секций, что обеспечивает их симметричное возбуждение. При работе С укороченными секциями, содержащими по 5 индукторов, в схеме генератора используется одна ФЛ с соответствующим изменением емкости конденсаторов ГИН. Конструктивно ГИН и ФЛ выполнены в виде отдельных блоков (модулей), связанных между собой высоковольтным зарядным кабелем.

На Рис. 9 показаны расчетные импульсы напряжения зарядки линии от 4каскадного ГИНа и напряжения на согласованной нагрузке на выходе формирующей линии.



Рис. 9. Расчетные импульсы напряжения зарядки линии от 4-каскадного ГИН и напряжения на согласованной нагрузке на выходе формирующей линии. 1 – напряжение зарядки линии без срабатывания коммутатора; 2 – напряжение на входе линии при срабатывании разрядника при t=650 нс; 3 – напряжение на нагрузке, соответствующее этому времени коммутации линии

Ключевыми элементами генератора, определяющими его основные рабочие характеристики, являются формирующие линии с коммутирующими разрядниками.

Формирующие линии.

Формирующие линии имеют коаксиальную конструкцию. По результатам расчетов электропрочности линии с водяной изоляцией с учетом возможных многократных отражений в рассогласованном режиме были определены диаметры внешнего и внутреннего электродов линии, которые составляют соответственно 200 мм и 150 мм. Для получения импульсов длительностью около 80 нс длина цилиндрической части линии выбрана равной 1 м. При разработке конструкции линии и связанных с ней узлов основное внимание было уделено выбору геометрии всех элементов, при которых градиенты электрического поля не превышают допустимых при максимальном напряжении зарядки линии.

Коммутатор формирующей линии.

Коммутирующий газовый разрядник смонтирован в промежуточной секции между формирующей линией и маслонаполненным кабельным коллектором.

Отдельного корпуса разрядник не имеет. В базовом варианте конструкции он образован двумя электродами диаметром 90 мм с тороидальной рабочей поверхностью, установленными на изоляционных диафрагмах, отделяющих линию с водяным заполнением, с одной стороны, и маслонаполненный объем кабельного коллектора, с другой стороны. Такая конструкция разрядника отличается простотой и обеспечивает его наддув газом, а также эффективную продувку рабочего промежутка в периодическом режиме работы генератора.

Рабочий зазор между электродами в зависимости от режима работы генератора и используемого для заполнения разрядника газа составляет 2 - 3 см. Необходимая для нормальной работы разрядника электропрочность В радиальном направлении, при которой исключаются радиальные пробои в областях на выходе формирующей линии и переходных на входе В маслонаполненный кабельный коллектор, обеспечивается применением профилированных изоляционных диафрагм. Геометрия диафрагм выбиралась по результатам численных расчетов с целью достижения достаточно равномерного распределения потенциалов по ним как во время зарядки линии (до срабатывания разрядника), так и после коммутации. Кроме того, при выборе геометрии диафрагм немаловажной была оценка возможности их изготовления на простом станочном оборудовании. В качестве материала диафрагм выбрано оргстекло.



Рис. 10. Расчетное распределение потенциалов в области разрядника до коммутации. Слева – область ФЛ, справа – маслонаполненный коллектор. Напряжение на разряднике 200 кВ, шаг эквипотенциалей 10 кВ. Радиальный (r) и аксиальный (z) размеры даны в см.



Рис. 11. Расчетное распределение потенциалов в области разрядника после коммутации. Слева – область ФЛ, справа – маслонаполненный коллектор. Напряжение 100 кВ, шаг эквипотенциалей 5 кВ.

Результаты расчетов распределения поля в области разрядника для диафрагм оптимизированной с учетом сказанного выше геометрии представлены на Рис. 10 и Рис. 11.

Из приведенных на рисунках результатов расчетов видно, что области с явно выраженным усилением поля отсутствуют. Распределение потенциалов по наиболее слабым с точки зрения электропрочности границам раздела сред, т.е. по поверхностям диафрагм, достаточно однородно. Для диафрагмы на выходе формирующей линии, находящейся к концу зарядки под полным напряжением 200 кВ, максимальная напряженность поля на границе раздела твердый диэлектрик-газ не превышает 45 кВ/см при средней напряженности по этой поверхности около 30 кВ/см.

После пробоя искрового промежутка разрядника и начала разряда линии на нагрузку в виде набора кабелей, согласованных по волновому сопротивлению с линией, напряжение на диафрагмах падает вдвое (до 100 кВ). Соответственно, снижаются напряженности поля на поверхности диафрагм в газе, которые, как показывают расчеты, в этом случае не превышают 22 кВ/см для диафрагмы ФЛ 20 кВ/см для диафрагмы кабельного коллектора. Такие значения И необходимую обеспечивают напряженности электрического поля ДЛЯ устойчивой работы электропрочность системы даже в условиях интенсивной УФ-подсветки диафрагм искровым разрядом при рабочих давлениях газа в разряднике 2 – 3 ати.

Показанный на Рис. 10 и Рис. 11 межэлектродный промежуток разрядника, равный 2 см, соответствует использованию генератора в режиме одиночных

импульсов с наполнением разрядника элегазом (SF₆) или смесью 50% SF₆ + 50% N_2 под давлением до 3,5 ати. При работе в периодическом режиме зазор между электродами увеличивается до 2,5 – 3 см, а в качестве рабочей среды используется азот с протоком под давлением до 3 атм, получаемый осушением и мембранным разделением воздуха.

вопросов при одновременной Одним ИЗ ключевых работе двух формирующих линий, т.е. генератора в полном составе, является вопрос синхронной коммутации линий. Традиционным его решением является использование на выходе линий управляемых искровых разрядников с тремя и более электродами, на управляющие электроды которых от внешнего генератора подается мощный высоковольтный импульс с коротким по сравнению с длительностью импульса ФЛ фронтом. Другое применяемое на практике решение основано на использовании излучения импульсного лазера для одновременной подсветки И инициализации пробоя промежутков синхронизуемых разрядников. Использование любого из этих двух методов ведет к существенному усложнению как конструкции разрядника, так и генератора в целом.

Альтернативным решением вопроса синхронизации коммутаторов двух ΦЛ использование В данном случае является разработанных нами двухэлектродных неуправляемых разрядников, стабилизированных импульсным коронным или вспомогательным искровым разрядом. Решение основано на введении в область разрядника вспомогательного коронирующего промежутка, являющегося источником предварительной ионизации газа, что ведет к резкому уменьшению разброса напряжения самопробоя, а в импульсном режиме с быстрым нарастанием напряжения на разряднике - времени срабатывания разрядника. В настоящее время ведутся детальные исследования характеристик разрядников со стабилизирующим импульсным коронным разрядом. Однако, уже имеющиеся данные свидетельствуют о возможности их применения в конструкции данного генератора и решения задачи синхронной работы двух линий с допустимым разбросом времени коммутации. На Рис. 12 показан пример коммутации двух ФЛ на одну нагрузку при задержке времени срабатывания разрядников.



Рис. 12. Синхронизация работы двух ФЛ

Кабельный коллектор.

Узел кабельного коллектора представляет собой короткую маслонаполненную секцию с цилиндрическим корпусом такого же диаметра, как и корпус ФЛ и разрядника, с установленными на нем вводами для 10 кабелей. Для импульсов коаксиальных передачи к индукторам ЛИУ используются импульсные высоковольтные кабели типа КВИ-100 с волновым сопротивлением 20 Ом.

Узел ввода зарядного напряжения.

Для ввода зарядного напряжения в ФЛ от ГИН используется один стандартный высоковольтный кабель марки ABB на напряжение 35 кВ с изоляцией из структурированного полиэтилена диаметром 32 мм, надежно работающий в импульсном режиме (при малых временах воздействия напряжения) при напряжениях свыше 200 кВ. Узел ввода представляет собой маслонаполненную секцию, отделенную от объема ФЛ изоляционной диафрагмой, аналогичной по конструкции диафрагмам разрядника. Ввод кабеля осуществляется с торца секции.

По сравнению рассмотренным генератором С выше на основе конденсаторов-формирователей импульсов генератор С водяными формирующими линиями представляет собой значительно более сложную конструкцию. Однако, учитывая высокую стоимость разработки и изготовления условиях небольшой партии опытных в заводских конденсаторовформирователей, его практическая реализация В настоящее время представляется более реальной, поскольку большинство элементов генератора

могут быть изготовлены в лабораторных мастерских или условиях опытного производства.

Литература

- A.V.Agafonov, E.G.Krastelev. Double-sided Relativistic Magnetron. In. Proc. of the 11-th Intern. Pulsed Power Confer. (PPC'97), Baltimore, USA, 1997, v. 2, p. 774 – 779.
- 2. А.В.Агафонов, Е.Г.Крастелев. Релятивистский магнетрон с симметричным питанием. Вопросы атомной науки и техники, Серия: Ядерно-физические исследования, Харьков, 1997, в.4, с. 198 200.
- W.Manheimer. High-power microwaves for defense and accelerator applications. AIP Conference Proc. N 249. The physics of particle accelerators. (Eds. M.Month, M. Dienes). AIP, 1992. v. 2, pp. 1795-1838.
- J.Benford, J.S.Levine, S.K.Lam, B.D.Harteneck, D.Price, M.J.Willey. Relativistic magnetrons and klystrons at long pulse duration. Proc. 10th International conference on high-power particle beams, "BEAMS-94", San Diego, USA, 1994. v. 1, pp. 272-275.
- J.Benford, H.Sze, D.Bromley, B.Harteneck. Progress on relativistic magnetron. Proc. of the 6th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams, Japan, 1986, v. 2, 577-580.
- 6. Okress E. (ed.). Crossed-field microwave devices. Academic Press. N.Y., 1961.
- 7. Y.Y.Lau. In: High power microwave sources. (Eds. Granatstein and Alexeff). Artech House, 1987, p. 309.
- 8. J. Benford. Ibid., p. 351.
- 9. J.Benford, H. Sze, T.Yong, D.Bromley, G.Proulx. Variations on the relativistic magnetron. IEEE Trans. Plasma Sci. 1985, PS-13, p. 538.
- 10.A. Palevsky, G. Bekefi. Phys. Fluids. 1979. v. 22, p. 986.
- 11.Н.Ф.Ковалев, В.А.Пападичев и др. Мощный релятивистский магнетрон 3-см диапазона. Письма в ЖТФ. 1980. т. 6, в. 8, с. 459-464.
- 12.M.I.Fuchs, V.A.Papadichev et al. Investigation of high-power microwave generation in relativistic magnetrons. Proc. of the 4-th Intern. Conf. on High Power Particle Beams, "BEAMS-81", Palaiseau, France, 1981, v 2, pp. 839--846.
- 13.K. Treado et al. IEEE Trans. Plasma Sci. 1988. PS-16, p. 237.

- 14.J.Benford, J.Levine. A compact phase locked module of relativistic magnetrons. Proc. of the 8-th Intern. Conf. on High Power Particle Beams, "BEAMS-90", Novosibirsk, USSR, 1990. v. 1, pp. 321--328.
- 15.P.~V.~Kotetashwily, P.~V.~Rybak, V.~P.~Tarakanov. KARAT a means for a computer experiment in electrodynamics, Institute of General Physics, Moscow, Russia, Preprint no. 44, 1991.
- 16.A.V. Agafonov, E.G. Krastelev, A.N. Lebedev. Formation of localised electron flow inside an interaction region of relativistic magnetron. Problems of atomic science and technology. 2004, N 2, 132-134.
- 17.A.V.Agafonov, E.G.Krastelev, A.N.Lebedev. Symmetric Low-Voltage Powering System for Relativistic Electronic Devices. Particles and Nuclear Letters, 2005, № 3 (126), 50-53.
- 18.Е.Г. Крастелев. Система импульсного питания двухсекционного ЛИУ драйвера релятивистского магнетрона. "Научная сессия МИФИ – 2004", 24 – 27 января, 2004 г., т. 7, 164-165.
- 19.A.V.Agafonov, E.G.Krastelev, V.P.Pechev. Pulsed power generators for twosection LIA – relativistic magnetron driver. Proc. of the 19th Russian Accelerator Conference (RUPAC XIX), Dubna, October 4-8, Russia. p. 490-492.
- 20.V.V.Bulan, E.V.Grabovsky, A.N.Gribov, V.G.Lujnov. The nanosecond generator RG-1 with near-rectangular pulse. Proc. of the 11-th Intern. Conf. on High Power Particle Beams, "BEAMS-96", Prague, Czech Republic, 1996, v. 2, pp. 942-945.