

03;09;10

Влияние вакуумных условий на СВЧ-генерацию в виркаторе

© В.Д. Селемир, А.Е. Дубинов, Б.Г. Птицын, А.А. Евсеенко,
В.А. Лелягин, Р.К. Нургалиев, В.Г. Суворов, А.В. Судовцов

Российский федеральный ядерный центр — ВНИИ экспериментальной физики, Саров

E-mail: dubinov@ntc.vniief.ru

В окончательной редакции 2 июля 2001 г.

Рассмотрено влияние давления остаточного газа на время жизни виртуального катода (ВК). Измерена зависимость энергосодержания в СВЧ-импульсе, генерируемом мощным виркаторм. Показано, что без существенного снижения энергии излучения возможно использование только форвакуумного насоса при давлении остаточного газа $5 \cdot 10^{-4}$ Торр. Данные эксперимента согласуются с представлениями о механизме исчезновения ВК при ионизации газа.

СВЧ-генераторы с виртуальным катодом (ВК) — виркатормы — являются в настоящее время наиболее популярными приборами в сверхмощной релятивистской СВЧ-электронике. Принцип работы виркаторма основан на создании в вакуумированной трубе дрейфа ВК, осцилляции которого вызывают СВЧ-генерацию. Обзор техники и физики работы виркатормов представлен в [1].

Обычно в вакуумных полостях виркаторма получают разрежение до $10^{-4} \dots 10^{-5}$ Торр с помощью последовательной откачки форвакуумным насосом до нескольких единиц 10^{-3} Торр, а затем с помощью паромасляного насоса доводят давление разреженного остаточного газа до требуемого значения.

Однако какое давление остаточного газа действительно необходимо для оптимального функционирования виркаторма, является важным технологическим вопросом, ответ на который, по-видимому, должен решаться отдельно для каждого конкретного генератора.

Цель данной работы заключалась в том, чтобы провести экспериментальные исследования влияния вакуумных условий в рабочем объеме мощного виркаторма на его излучательные характеристики.

Перед тем как перейти к описанию экспериментов, укажем некоторые известные из литературы факты, позволяющие спрогнозировать результаты данных экспериментов.

Согласно известным теоретическим представлениям [2], если сверхпределный пучок электронов инжектируется в трубу дрейфа виркатора, заполненную остаточным газом низкого давления, то сначала в ней формируется ВК, вблизи которого происходит наиболее интенсивная ионизация газа (вблизи ВК скорость электронов мала, а плотность электронов многократно превышает плотность вблизи плоскости инжекции). При этом ВК насыщается ионами газа, происходят его зарядовая нейтрализация и смещение по направлению движения пролетных электронов. В новом положении также происходят ионизация и дальнейшее смещение, чем обеспечивается направленное движение ВК, и возможен захват части ионов газа в режим ускорения. После того как движущийся ВК совместно с захваченными ионами достигнет противоположной стенки трубы дрейфа — коллектора — СВЧ-генерация прекращается.

Таким образом, время жизни ВК, которое зависит как от скорости ионизации газа, так и от длины пути его движения до коллектора, определяет время СВЧ-генерации виркатора. И если время жизни ВК превышает длительность высоковольтного импульса питания виркатора, то ионизация газа сказывается на излучательных характеристиках не должна.

Экспериментальные исследования зависимости времени жизни ВК в нерелятивистском пучке проводились в [3], где было показано, что время существования ВК можно описать простой формулой

$$\tau = \frac{\alpha}{p} \left(1 - \frac{I_{\text{lim}}}{I} \right), \quad (1)$$

где p — давление газа, I — ток инжекции пучка, I_{lim} — предельный ток для данной геометрии трубы дрейфа, α — постоянная, зависящая от сорта газа. Например, для воздуха эта постоянная примерно составляет $2 \cdot 10^{-10}$ Торг. В работе [4] формула (1) в результате учета неравномерности по длине пучка зарядовой нейтрализации была уточнена с уменьшением примерно в 1.5 раза.

Попутно заметим, что работы [3,4] фактически определили научные предпосылки использования конечности времени жизни ВК τ для целей измерения сверхглубокого вакуума, при этом само значение τ можно

определить по моменту скачка вверх пролетного тока или исчезновения СВЧ-излучения. Так, например, в работе [5] был предложен и исследован датчик давления газов в диапазоне $p = 5 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-9}$ Торр на основе электронного пучка с ВК, а также были найдены значения коэффициента α для водорода, азота и аргона.

Перейдем к рассмотрению влияния давления остаточного газа на СВЧ-генерацию мощного релятивистского виркатора.

Исследуемый в данной работе виркатор был создан на базе безжелезного линейного индукционного ускорителя электронов (ЛИУ) на радиальных водяных линиях "КОРВЕТ", ранее использовавшегося в качестве инжектора установки ЛИУ-10 [6]. Схема ускорителя с виркатором показана на рис. 1.

Этот виркатор представлял собой совокупность коаксиальных катодного электрода и охватывающего его анодного электрода. Катодный электрод состоял из катододержателя, выполненного в виде тонкостенной трубки из нержавеющей стали толщиной 0.2 мм, к которой с анодной стороны была приварена стальная подложка. К подложке с помощью винтов крепились графитовые цилиндрические элементы диаметром 20 мм и длиной 40 мм, выполнявшие роль эмиттеров. Всего на подложке, плотно друг к другу, располагалось 8, 10 или 12 эмиттеров, образуя катод с внешним диаметром 72, 92 или 112 мм соответственно.

Анодный электрод представлял собой полый цилиндр диаметром 160 мм и длиной 380 мм. В цилиндр вставлялось металлическое кольцо, на которое с помощью электросварки натягивалась анодная сетка с квадратными ячейками, выполненная из нихромовой проволоки диаметром 0.3 мм. Размер ячейки сетки 3 мм. Передвигая вдоль оси виркатора кольцо с анодной сеткой, можно варьировать величину катод-анодного промежутка виркатора. В данной работе она варьировалась в пределах $8 \div 13$ мм.

Анодный электрод заканчивался рупорной конической антенной с углом раскрытия излучающего рупора 10° . Диаметр выводного окна, отделяющего вакуумный объем виркатора от внешнего воздушного пространства и выполненного из листового оргстекла, равнялся 700 мм.

Величина напряжения, развиваемого в диоде виркатора, составляла 1 МВ при максимальной зарядке блока индукторов. Ток в диоде при этом достигал 35 кА при длительности импульса 40 нс, что по оценкам в ~ 2 раза превышает значение предельного тока пучка в анодной полости за сеткой (15–20 кА).

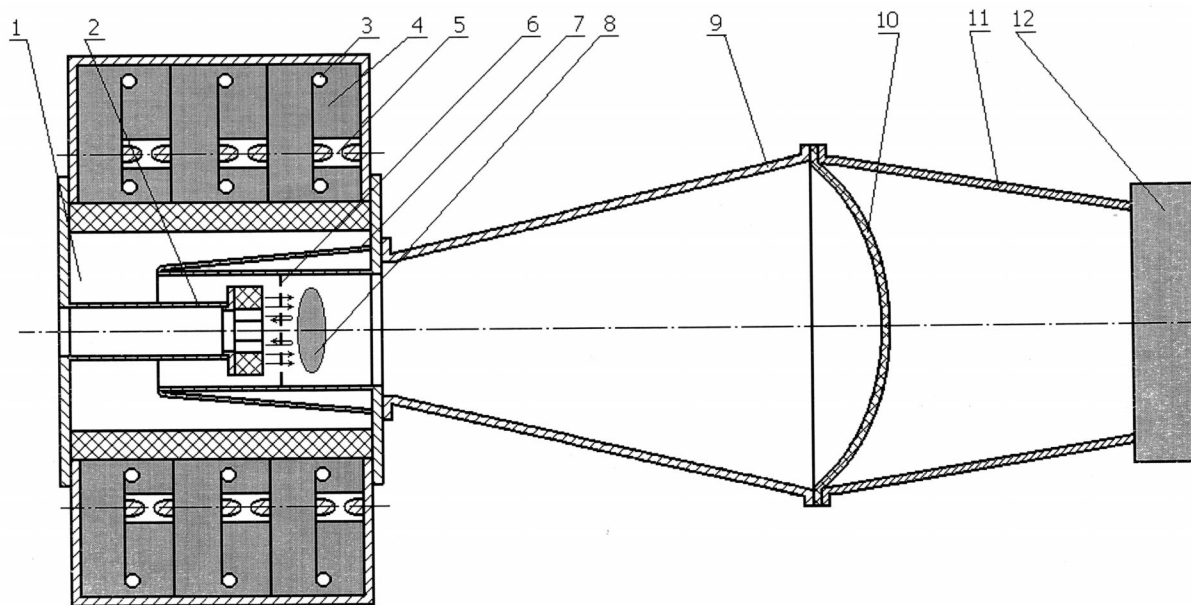


Рис. 1. Схема виркатора на основе безжелезного ЛИУ: 1 — вакуумный объем ускорителя, 2 — катод, 3 — высоковольтный электрод блока индукторов, 4 — деионизованная вода, 5 — газонаполненный управляемый разрядник, 6 — анодная сетка, 7 — анод, 8 — ВК, 9 — выходной рупор, 10 — окно вывода СВЧ-излучения, 11 — согласующий рупор, 12 — СВЧ-калориметр.

Путем варьирования величины катод-сеточного промежутка, диаметра катода, длины катододержателя удалось оптимизировать виркатор по величине генерируемой мощности, которая достигает 520 MW (данные измерений полупроводниковыми детекторами "на горячих носителях" [7]) на длине волны ~ 3 см. Для измерения энергосодержания в импульсе использовался СВЧ-калориметр разработки и производства ИПФ РАН. Конструктивно калориметр состоит из вакуумно-плотного цилиндрического корпуса с фланцами, входного волновода, поглощающей секции, терморазвязки и крышки. Внутри корпуса между входным волноводом и терморазвязкой зажат диск из полиэтилена, в отверстиях которого установлены 236 блоков термопарных, состоящих из поглощающего элемента и термодатчика. Блоки термопарные соединены последовательно. Напряжение, вырабатываемое ими, подается через разъем СР75 на микровольтметр фирмы "Hewlett-Packard" типа 34790А. Калориметр предназначен для измерения энергии СВЧ излучения как одиночных импульсов, так и пачки импульсов в сверхразмерных волноводных трактах. Диапазон измеряемой энергии от 0.1 до 100 J в диапазоне частот 6–11 GHz. Чувствительность составляет $34 \pm 3 \mu\text{V/J}$ при КСВН не более 1.65. Инерционность калориметра 55...60 s. Для сопряжения выходного окна рупора и калориметра из жести толщиной 1 mm был сварен усеченный конус длиной 1.4 m ввиду разности диаметров выводного окна рупора и приемного окна калориметра. Диаметр приемного окна калориметра равен 550 mm.

Общее энергосодержание в излучаемом СВЧ-импульсе составило ~ 2 J при максимальной мощности.

Зависимость энергосодержания в СВЧ-импульсе от давления остаточного газа в объеме виркатора снималась следующим образом.

С помощью натекания воздуха в объем виркатора при отключенных насосах устанавливалось определенное давление остаточного газа по данным измерения ионизационным манометром типа ПМИ-10 и показаниям вакуумметра типа ВИТ-3. При этом давлении проводилось несколько импульсов, а затем данные измерений на СВЧ-калориметре усреднялись.

Полученная зависимость показана на рис. 2. Из графика видно, что энергия, содержащаяся в выводимом СВЧ-импульсе, практически не меняется при остаточном давлении воздуха в камере виркатора, не превышающем $5 \cdot 10^{-4}$ Torr. На основании этого можно сделать вывод, что при проведении экспериментов использование паромасляного

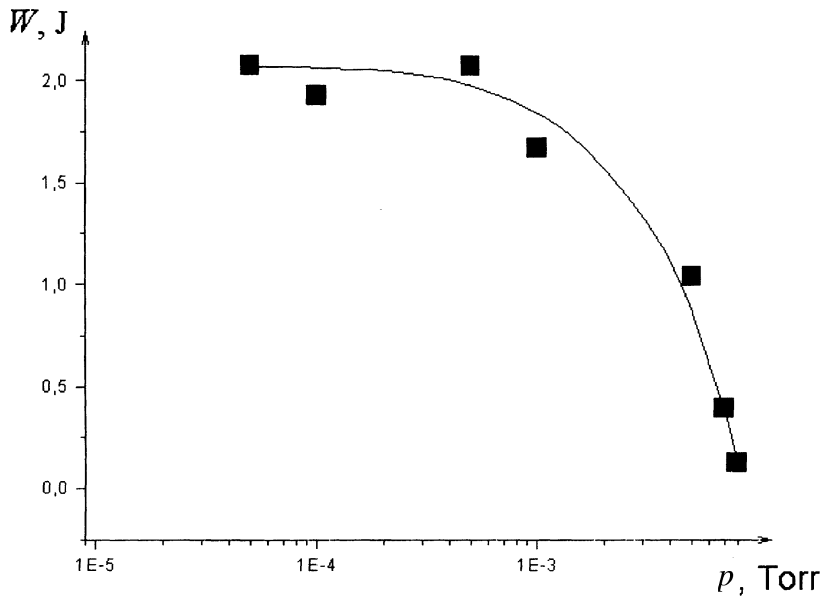


Рис. 2. Зависимость энергосодержания в СВЧ-импульсе виркатора от остаточного давления воздуха.

насоса не является необходимостью и уже достаточно использование только форвакуумного насоса. Это приведет к существенному сокращению времени, затраченному на один эксперимент. Но заметим, что такие благоприятные выводы могут оказаться несправедливыми для виркаторов с большей длительностью импульса тока.

Здесь необходимо отметить еще одно важное обстоятельство: повышение давления в рабочем объеме виркатора может приводить к ионным колебаниям на частотах порядка нескольких десятков МГц [8], что может сказаться на генерационных характеристиках длинноимпульсных виркаторов. В нашем же случае, когда длительность импульса существенно меньше периода возможных ионных колебаний, их влиянием можно пренебречь.

Кроме того, оценки по формуле (1) для давления $5 \cdot 10^{-4}$ Torr позволяют утверждать, что время жизни ВК составляет ~ 40 ns, а

при большем давлении оно становится меньше длительности импульса тока (40 ns). Это согласуется с рассмотренными ниже модельными представлениями о механизме исчезания ВК при ионизации газа.

Авторы благодарны В.И. Волосову, приславшему нам свои работы по исследованию времени жизни ВК.

Список литературы

- [1] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 4. С. 54.
- [2] Ходатаев К.В., Шаханова Е.В. Резонансное ускорение ионов в электрическом поле летящего псевдокатода РЭП (численный эксперимент на одномерной модели). Препринт № 79. М.: ИПМ АН СССР, 1986.
- [3] Волосов В.И., Чириков Б.В. // ЖТФ. 1957. Т. 27. № 2. С. 2624.
- [4] Мальшиев И.Ф., Рыбас К.П. // Электрофизическая аппаратура. М.: Атомиздат, 1964. № 2. С. 179.
- [5] Lloyd O. // British J. Appl. Phys. 1966. V. 17. N 3. P. 357.
- [6] Павловский А.И., Босамыкин В.С., Савченко В.А. и др. // ДАН СССР. Т. 250. № 5. С. 1117.
- [7] Райзер М.Д., Цопп Л.Э. // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. № 8. С. 1691.
- [8] Балакирев В.А., Горбань А.М., Магда И.И. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 4. С. 350.