

Э. Л. БОЯРИНЦЕВ, В. А. КАПИТОНОВ, В. А. КОРНИЛОВ

«ВОДЯНОЙ» — ГЕНЕРАТОР МОЩНОГО ПУЧКА
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

(Представлено академиком Г. И. Будкером 26 XII 1973)

Для экспериментального исследования эффективности нагрева плотной плазмы мощным пучком релятивистских электронов в Институте ядерной физики СО АН СССР создан «Водяной» — генератор сильноточного электронного пучка. Этот генератор является продолжением работ, начатых в 1965 г. по предложению Г. И. Будкера по использованию в накопителях энергии в качестве диэлектрика специально очищенной воды (^{1, 2}). В описываемом ниже генераторе используется формирующая линия с водяной изоляцией, причем для увеличения электрической прочности воды производится сжатие в баке генератора до 100 атм (³).

Принципиальная схема генератора приведена на рис. 1. Энергия, запасенная в конденсаторной батарее C , передается через повышающий напряжение трансформатор Тесла L_1L_2 в формирующую линию 2 (время зарядки ~ 6 мсек.), а затем посредством коммутирующего разрядника 3 — в вакуумный диод $8, 9$. Трансформатор, линия, коммутатор, а также диод помещены в бак 1 диаметром 50 см, заполненный водой с удельным сопротивлением 20 Мом·см. Физико-химическая очистка воды ведется в замкнутом цикле.

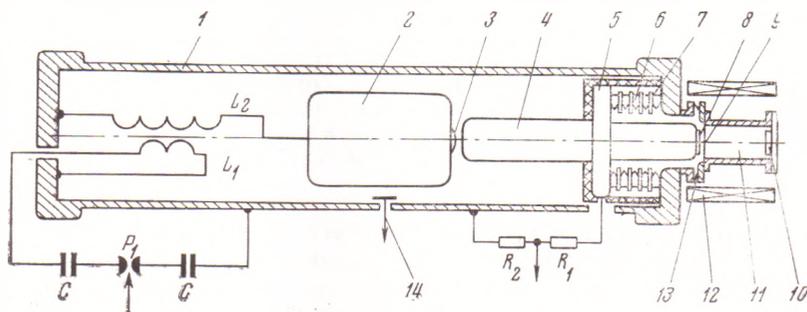


Рис. 1. Схема генератора

Батарея C , элементами которой являются конденсаторы типа КММ-50×2,5 емкостью 2,5 мкф с напряжением 50 кв, разделена на две секции, включаемые последовательно через трехэлектродные воздушные разрядники P_1 . Общая емкость батареи в рабочем режиме 4,7 мкф, напряжение 52 кв.

Резонансный трансформатор Тесла с коэффициентом трансформации напряжения ~ 22 состоит из двух коаксиальных обмоток. Число витков первичной обмотки трансформатора — 2, вторичной — 63. Для уменьшения градиента напряжения вдоль обмотки L_2 , возникающего при формировании импульса тока генератора, по предложению В. М. Федорова была примене-

на изоляция из полиэтиленовой пленки между обмотками трансформатора. При толщине изоляции 1,5 см величина градиента уменьшилась почти в 6 раз по сравнению с таковым для трансформатора без пленки.

Трансформатор соединяется с формирующей линией 2 через прозрачный для магнитного потока экран. Формирующая линия, волновое сопротивление которой 2,3 ом, емкость 7,8 нф имеет длину 55 см; в линию передается 70% энергии, запасенной в батарее С.

Коммутатор 3 с изменяемой в пределах от 3 до 4 см длиной разрядного промежутка работал в режиме самопробоя. Максимальная величина индуктивности коммутатора была по оценкам $\sim 6 \cdot 10^{-8}$ гн. Согласно результатам обработки вольт-амперных характеристик генератора, сопротивление канала разрядника уменьшалось, достигая величины ≤ 1 ом через 20 нсек. от начала тока. Вследствие того, что коммутатор работал в режиме самопробоя, временной разброс момента включения его был велик (в пределах 600 нсек.), и, следовательно, величина напряжения на формирующей линии менялась от импульса к импульсу от 800 до 1100 кв.

Для уменьшения напряжения предимпульса на катоде между формирующей линией и диодом включен отрезок коаксиальной линии 4 с волновым сопротивлением, равным 8 ом. Это значение волнового сопротивления промежуточной линии было определено расчетным путем из условия оптимальной передачи энергии в согласованную с ней нагрузку за время импульса тока, равное 45 нсек. (для известных значений индуктивностей вакуумного диода $5,8 \cdot 10^{-8}$ гн и коммутатора).

Изолятор ускорительной трубки состоит из пяти секций 6 из оргстекла, толщиной 2,5 сек., разделенных градиентными кольцами 7. Внутренняя стенка секций имеет двойной скос под углом 45° для увеличения электрической прочности. Для получения более равномерного распределения напряжения вдоль трубки последняя была окружена полиэтиленовой пленкой 5.

Катод вакуумного диода 8 — диск из нержавеющей стали, диаметром 10 см. Длина зазора анод — катод равна 0,8 см; в качестве анода 9 применена титановая фольга толщиной 65 мкм. Катодный узел помещен в магнитное поле, создаваемое соленоидом 12.

Давление остаточного газа в ускорительной трубке составляло 10^{-5} – 10^{-6} мм. рт. ст., в дрейфовой камере — 10^{-3} мм рт. ст.

Полный ток вакуумного диода измерялся шунтом 13, резистивные элементы которого были изготовлены из нихрома (фольга, толщиной 30 мкм). Временное разрешение шунта составляло 1,5 нсек. и ограничивалось его индуктивностью.

Напряжение на диоде регистрировалось с помощью расположенного внутри бака 1 омического делителя R_1R_2 , плечи которого представляли собой жидкостные сопротивления (водный раствор NaCl, залитый в цилиндрическую полость в блоке из органического стекла). Применение низкоомного делителя ($R_1+R_2=100$ ом) и промежуточной линии 4 позволило уменьшить величину предимпульса напряжения на катоде до 3% от напряжения на формирующей линии.

Напряжение на накопителе контролировалось емкостным датчиком 14.

Погрешности измерений тока, напряжения на ускорительной трубке и на формирующей линии были соответственно равны 10; 15 и 15%.

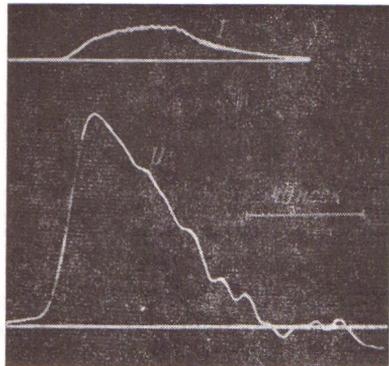


Рис. 2. Оциллограммы тока I и напряжения U на ускорительной трубке; $U_{\max}=930$ кв, $I_{\max}=100$ ка

Уже в первых экспериментах было обнаружено, судя по эрозии анода, что пучок в диодном промежутке сжимался до диаметра ~ 3 см, в результате чего анодная фольга разрушалась через несколько импульсов тока. Помещение диода в аксиальное магнитное поле величиной, равной собственному магнитному полю тока диода (~ 4 кэ), предотвратило сжатие пучка и увеличило число импульсов без разрушения фольги более чем на порядок. Устранение сжатия подтверждают эксперименты по измерению диаметра пучка путем анализа отпечатков, создаваемых электронами на пластинке из астралона ⁽⁴⁾, расположенной сразу за анодной фольгой. Приводимые ниже результаты экспериментов относятся к диоду в аксиальном магнитном поле ~ 4 кэ.

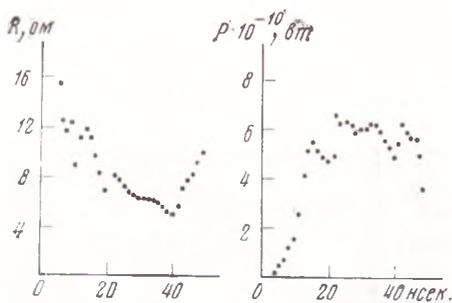


Рис. 3. Зависимость от времени активного сопротивления R диода и подводенной к нему мощности P ; $U_{\max} = 930$ кв, $I_{\max} = 100$ ка

Типичные осциллограммы тока диода I и напряжения на ускорительной трубке U представлены на рис. 2. Максимальное значение I , как показывают проведенные эксперименты, совпадает с величиной, вычисленной по формуле

$$I = 8,5 \cdot 10^3 \beta \gamma r / d,$$

которая дает предельное значение тока диода (в амперах) с учетом собственного магнитного поля. Здесь $\beta = v/c$, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, v — скорость электронов пучка, c — скорость света, r и d — соответственно радиус катода и расстояние между катодом и анодом.

На рис. 3 показана зависимость от времени активного сопротивления диода, определяемого соотношением

$$R = \frac{U - L di/dt}{I},$$

где L — индуктивность ускорительной трубки. Значения I , U и скорости нарастания тока di/dt взяты из осциллограмм рис. 2. Колебания сопротивления диода, по-видимому, связаны с образованием плазмы в промежутке катод — анод.

Зависимость мощности от времени $P = I^2 R$ также представлена на рис. 3. Величина энергии, подводенной к диодному промежутку, определялась графическим интегрированием кривой мощности и составила 2,2 кдж.

Были проведены эксперименты по измерению энергии пучка с помощью калориметра из графита, расположенного на расстоянии 5 мм от анодной фольги (это расстояние меньше радиуса Дебая для наблюдаемых в эксперименте токов и энергий электронов). Оказалось, что калориметр диаметром, равным диаметру катода, регистрировал 50% от значений энергии, подводенной к диоду. Измеряемая таким калориметром величина энергии является, очевидно, минимальным значением полной энергии пучка, поскольку применение в качестве анода фольги из титана толщиной 65 мкм приводит к большому угловому разбросу электронов ($\sim 33^\circ$ согласно ⁽⁵⁾) и, следовательно, к увеличению диаметра пучка.

Максимальное значение тока диода и полного напряжения на ускорительной трубке, полученные на первом этапе эксплуатации генератора, были равны соответственно 110 ка и 1 Мв, мощности — $8 \cdot 10^{10}$ вт, активного напряжения (энергии электронов) — 800 кв, энергии, подводенной к диоду, — 2,5 кдж при напряжении на формирующей линии 1,1 Мв.

В заключение авторы выражают благодарность акад. Г. И. Будкеру за поддержку данной работы, Д. Д. Рютову и В. М. Федорову за обсуждение результатов, В. М. Лагунову и А. Г. Пономаренко за участие в разработке генератора, Г. М. Дуленкову и Н. И. Сапутину за конструирование установки, Б. П. Заеву и А. В. Кутовенко за помощь в проведении экспериментов.

Институт ядерной физики
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
25 XII 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Б. И. Куликов, В. М. Лагунов и др., Авт. свид. № 270059 с приоритетом от 18 II 1966. ² В. А. Капитонов, В. А. Корнилов и др., Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 2, 29 (1970). ³ Е. А. Абрамян, В. А. Корнилов и др., ДАН, т. 201, № 1 (1974). ⁴ Б. П. Санников, Тр. симпозиума по сильноточной электронике, Томск, 1973, стр. 22. ⁵ Н. А. Bethe, Phys. Rev., v. 89, № 6 (1953).