

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

П.К. Гелхвицдзе, В.С. Иванов, С.И. Кременцов, М. Д. Райзер

Приведены основные данные ускорителя и результаты экспериментального исследования сильноточного релятивистского электронного пучка с энергией до 1,0 МэВ и длительностью 1,0 мкс.

В настоящее время проводятся интенсивные исследования релятивистских электронных пучков (РЭП) с длительностью импульса в диапазоне $1 \div 100$ мкс [1–3]. Основной принцип работы сильноточных ускорителей заключается в относительно медленном накоплении энергии с последующим ее быстрым использованием для однократного ускорения электронов. В описываемой схеме в качестве генератора импульсного напряжения (ГИН) использован десятикаскадный конденсаторный ударный контур, собранный по схеме Аркадьева – Маркса, который разряжается непосредственно на вакуумный диод (ударная емкость 0,04 мкФ).

ГИН вместе с коммутирующими разрядниками расположен вертикально в металлическом баке диаметром 1,6 м и высотой 3,5 м и находится в атмосфере осушенного азота под давлением до 4 атм. В этом же баке расположены неуправляемый газовый проходной разрядник для устранения предимпульса на диоде и управляемый тригatronный срезающий разрядник, момент срабатывания которого определяет длительность импульса напряжения на катоде. Ускорительная трубка – керамический изолятор конической формы – отделяет объем повышенного давления от вакуумного диодного узла. В ГИНе используются трехэлектродные газовые разрядники (азот, давление до 3 атм), коэффициент управления $U_{\max}/U_{\min} \approx 1,5$ (U_{\min} – зарядное напряжение, при котором ГИН запускается специальной схемой поджига, U_{\max} – значение зарядного напряжения, при котором наступает самопробой разрядников).

По результатам испытания ГИНа в режиме короткозамкнутого диода определены основные параметры контура: индуктивность $L \approx 5$ мкГн, волновое сопротивление $\rho \approx 11,2$ Ом, затухание $\delta \approx 7 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, период колебаний – 2,8 мкс. При работе ГИНа на вакуумный диод [4] за счет омических потерь в разрядном промежутке срезающего разрядника затухание возрастает до $1,4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

В качестве инжектора РЭП использовался коаксиальный диод с магнитной изоляцией (рис. 1) с цилиндрическим кромочным катодом из графита диаметром 18 мм. Анодом служила камера дрейфа диаметром $2R_0 = 54$ мм, которая далее ступенчато сужалась до диаметра 28 мм. Импульсное магнитное поле с индукцией до 2,3 Т и длительностью 3 мс создавалось соленоидом. Пробоочное отношение, т.е. отношение напряженностей магнитных полей в камере дрейфа, H_g , и на кромке катода составляло 1,7.

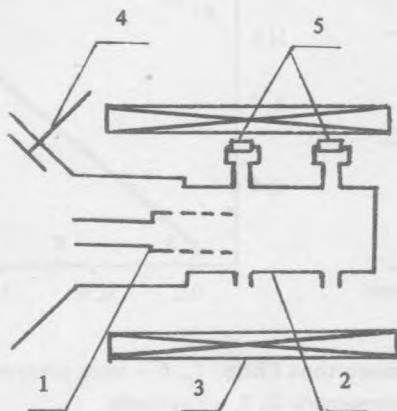


Рис. 1. Принципиальная схема диодного узла и камеры дрейфа: 1 – катод, 2 – камера дрейфа, 3 – соленоид, 4 – емкостной делитель, 5 – токовые шунты.

Регистрировались: полный ток ГИНа I_T и ток электронного пучка в камере дрейфа малоиндуктивными шунтами 5, напряжение на катоде — емкостным делителем 4 (рис. 1). Поперечный размер пучка определялся по автографам на фольге из нержавеющей стали.

На рис. 2 приведены начальный участок осциллограммы полного тока ГИНа, осциллограмма тока электронного пучка I_{II} в камере дрейфа и напряжение на катоде U_k при напряжении ГИНа $U_c = 750$ кВ и $H_g = 1,3$ Т. В течение $\sim 0,6$ мкс разряд ГИНа носит аperiodический характер, а затем, после срабатывания срезающего разрядника в момент t_1 , переходит в колебательный (на рис. 2а не показан). В течение $\sim 0,6$ мкс полный ток ГИНа с точностью до ошибок измерений равен току электронного пучка, т.е. токи утечки пренебрежимо малы. В этом случае энергия ударного контура расходуется только на создание потока ускоренных электронов. На рис. 2г показана экспериментальная зависимость U_k/I_{II} от времени. Видно, что имеется две области с постоянными величинами импеданса диода: при $t \leq 0,17$ мкс и $0,2 \leq t \leq 0,6$ мкс. Если считать, что за время аperiodического разряда ГИНа (до момента времени t_1 , рис. 2а) эквивалентное сопротивление $R_3 = \text{const}$, то по значению полного тока ГИНа I_T в момент времени $t^* > t_1$ (колебательный режим) можно определить значение ускоряющего напряжения на диоде U_k и величину импеданса из соотношений:

$$U_k(t_1) = I_T(t^*) \rho e^{\delta t^*},$$

$$U_k(t_1) = \frac{U_c}{a} \left\{ (1+a) \exp \left[-\frac{R_3}{2L} (1-a)t_1 \right] + (1-a) \exp \left[-\frac{R_3}{2L} (1+a)t_1 \right] \right\},$$

где $a = (1 - 4\rho^2/R_3^2)^{1/2}$. По измеренным значениям $I_T(t^*)$, δ , ρ и L определяются $U_k(t_1) \approx 0,9U_c$ и $R_3 \cong 170$ Ом. Таким образом, при токе электронного пучка ~ 4 кА и длительности импульса $\sim 0,6$ мкс максимальная энергия электронов в течение импульса изменяется от $\sim eU_c$ до $0,9eU_c$.

При зарядном напряжении 75 кВ полная энергия, запасенная в ГИНе, составляет 11 кДж, а энергия электронов в пучке по оценкам $\sim 1,7$ кДж, т.е. эффективность передачи энергии от ГИНа в пучок составляет $\sim 16\%$.

Если ограничиться длительностью напряжения (или тока нагрузки) на уровне $0,9U_c$, то при аperiodическом разряде максимальная эффективность передачи энергии от ударного контура в пучок электронов может достигать $\sim 50\%$ при $R_3 = 2\rho$.

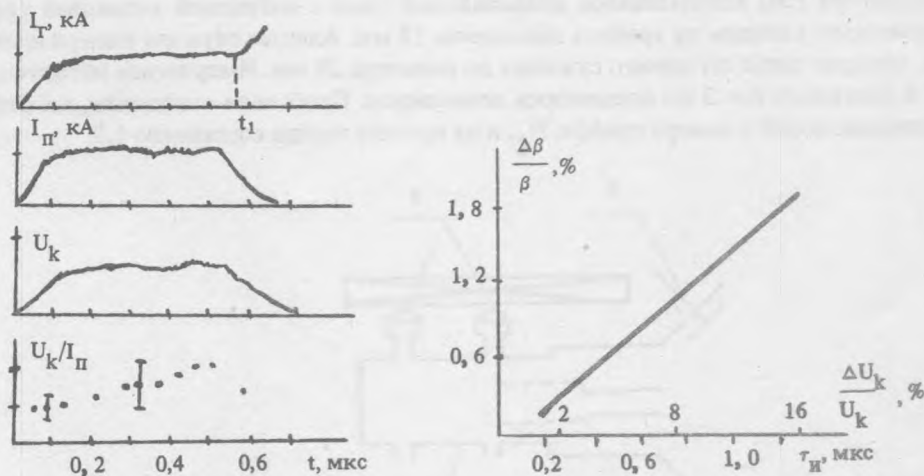


Рис. 2. Характерные осциллограммы: а — полного тока ГИНа I_T , б — тока электронного пучка I_{II} , в — напряжения на катоде U_k (в относительных единицах), г — зависимость U_k/I_{II} от времени.

Рис. 3. Зависимость изменения скорости электронов пучка $\Delta\beta/\beta$ от длительности импульса.

Изменение ускоряющего напряжения в течение импульса приводит к изменению кинетической энергии электронов и их скорости $\beta = v/c$. Используя экспериментально определенное значение эквивалентного сопротивления R_3 , можно рассчитать изменение ускоряющего напряжения $\Delta U_k/U_k$ и соответствующее изменение скорости электронов $\Delta\beta/\beta$ в зависимости от длительности импульса $\tau_{\text{и}}$. Из приведенной на рис. 3 зависимости следует, что при токе электронного пучка ~ 4 кА и $\tau_{\text{и}} \sim 0,6$ мкс изменение скорости электронов не превышает $\sim 1\%$.

При этом, однако, необходимо учитывать, что продольная скорость электронов пучка $\beta_{\parallel} = v_{\parallel}/c$ в дрейфовой камере отличается от их полной скорости β . В условиях эксперимента электронный пучок с током $I_{\text{п}} = 4$ кА практически без потерь транспортируется во внешнем продольном магнитном поле $1,3$ Т на расстояние 50 см. Автографы пучка показали, что радиус полого электронного пучка $r_{\text{п}} \approx 10$ мм. Продольная энергия γ_{\parallel} и продольная скорость β_{\parallel} в камере дрейфа определяются соотношением $/5/$:

$$\beta_{\parallel}(\gamma - \gamma_{\parallel}) = (I_{\text{п}}/8,5) \ln(R_0/r_{\text{п}}),$$

где $I_{\text{п}}$ — в кА. При $U_k = 700$ кВ ($\gamma = 2,4$; $\beta = 0,91$) величина $\gamma_{\parallel} = 1,79$ и $\beta_{\parallel} = 0,83$.

Таким образом, ускоритель с конденсаторным ударным контуром, непосредственно разряжаемым на инжектор, формирует РЭП с энергией электронов $\sim 0,7$ МэВ, током ~ 4 кА, длительностью импульса $\sim 0,6$ мкс с хорошей воспроизводимостью параметров. Пучок транспортируется в вакуумной камере дрейфа во внешнем магнитном поле на длину 50 см. Полная энергия в пучке $\sim 1,7$ кДж.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткач Ю. В. и др. ПТЭ, № 2, 129 (1976).
2. Глейзер И. З. и др. В кн. "Труды научно-исследовательского института ядерной физики при Томском политехническом институте", М., Атомиздат, 1979, в. 8, с. 8.
3. Ройфе И. М. и др. ЖТФ, 50, в. 5, 944 (1980).
4. Гелхвидзе П. К. и др. Препринт ИОФАН № 198, М., 1986.
5. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М., Мир, 1984, с. 113.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 18 июня 1986 г.