

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛЬНОТОЧНОГО ВАКУУМНОГО ПИНЧ-ДИОДА ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ «ГАММА-1»

Н. В. Завьялов, В. С. Гордеев, В. Т. Пунин, А. В. Гришин, С. Т. Назаренко, В. С. Павлов, В. А. Деманов, Д. А. Калашников, А. В. Козачек, К. В. Страбыкин, С. Ю. Пучагин, М. А. Моисеевских, Д. О. Мансуров, Б. П. Миронычев, Р. А. Майоров, В. Л. Майорникова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается четырехмодульная электрофизическая установка «Гамма-4» (2 МВ, 3 МА, 60 нс), предназначенная для генерации мощных импульсов тормозного излучения (ТИ). Одним из основных режимов работы установки является режим работы каждого модуля на свой автономный вакуумный диод.

Целью данной работы было определение электрических характеристик сильноточного вакуумного пинч-диода типового модуля установки «Гамма-4» – импульсного ускорителя электронов «Гамма-1». Всего было проведено 20 рабочих включений ускорителя «Гамма-1» при зарядном напряжении линий его формирующей системы 0,9 МВ. В экспериментах использовался пинч-диод с кольцевым катодом с внешним диаметром 168 мм. Импеданс диода регулировался путем изменения величины ускоряющего зазора между кромкой катода и мишенью в пределах от 4 до 14 мм.

Показано, что при изменении импеданса диода в пределах от 1,3 до 4,0 Ом могут быть реализованы режимы работы с формированием импульсов ТИ с граничной энергией квантов 0,9 до 2,0 МэВ.

1. Введение

Создаваемая четырехмодульная электрофизическая установка «Гамма-4» в специально спроектированном здании представлена на рис. 1. Установка предназначена для проведения исследований в области радиационной физики. Она состоит из четырех типовых модулей. Каждый модуль представляет собой сильноточный импульсный ускоритель электронов, формирующая система которого повторяет формирующую систему импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» [1]. Выходное сопротивление двойной ступенчатой формирующей линии (ДСФЛ) ускорителя «Гамма-1» составляет 2,9 Ом. Для обеспечения максимального выхода гамма-квантов с энергией до 100 кэВ в спектре излучения граничная энергия электронов не должна превышать 2 МэВ [2]. Выходной узел ускорителя «Гамма-1» представляет собой низкоимпедансный сильноточный вакуумный пинч-диод, образованный кольцевым катодом с выемкой около оси катода для предотвращения преждевременного замыкания зазора анод-катод плазмой. Фотография диода и конструкция узла секционированного изолятора (СИ) представлены

на рис. 2а и 2б. Фотографии мишени после рабочего включения представлены на рис. 2в.

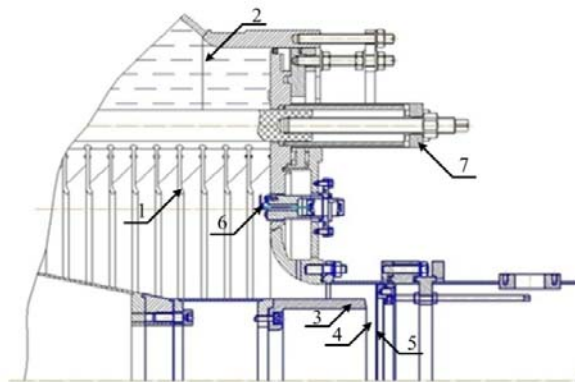


Рис. 1. Электрофизическая установка «Гамма-4» в специально спроектированном здании

Известно, что в вакуумном сильноточном пинч-диоде движение электронов может быть описано парapotенциальной моделью, следовательно, ток в диоде будет определяться в следующей виде:



а



б



в

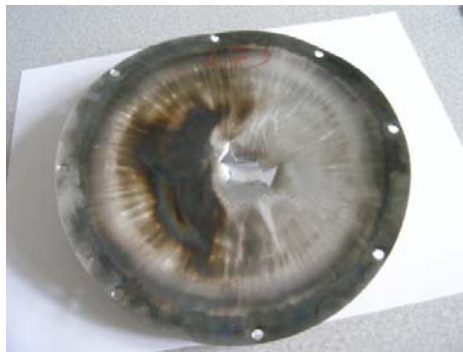


Рис. 2. Фотография пинч-диода (а) и конструкция СИ (б) ускорителя «Гамма-1». Фотография мишени (в) толщиной 1 мм после рабочего включения ($R_d = 3,1 \text{ Ом}$): 1 – секционированный изолятор, 2 – деионизованная вода, 3 – катод, 4 – зазор, 5 – анод, 6 – флюксметр, 7 – диэлектрическая шпилька, на место которой устанавливается резистивный жидкостный делитель напряжения

$$I = 8,5 \cdot \gamma \cdot \frac{\ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) r}{d_{eff}}, \quad (1)$$

где I – ток в диоде в кА, r – радиус катода; d_{eff} – эффективный зазор в диоде; $\gamma = 1 + \frac{eU}{mc^2}$ – релятивистский фактор; U – напряжение на диоде в В; mc^2 – энергия покоя электрона; e – заряд электрона.

Импеданс диода R_d (в максимуме импульса мощности пучка) в этом режиме можно рассчитать по формуле [2]:

$$R_d = \frac{U}{I} = \frac{mc^2(\gamma - 1)}{eI} = \varphi(\gamma) \cdot \frac{d_{eff}}{r}. \quad (2)$$

В диапазоне напряжений на диоде $0,5 \leq U \leq 2,0 \text{ МВ}$ функция $\varphi(\gamma)$ слабо зависит от U и равняется 21–23 [Ом]. Таким образом, при работе с вышеописанным диодом его импеданс будет зависеть только от эффективного зазора d_{eff} между анодом и катодом.

На ускорителе электронов «Гамма-1» с системой передачи энергии от типового модуля установки «Гамма-4» были проведены экспериментальные исследования такого пинч-диода. Импеданс диода регулировался путем изменения величины ускоряющего зазора между кромкой катода и мишенью в пределах от 4 до 14 мм.

2. Экспериментальные исследования

Работа формирующей системы ускорителя «Гамма-1» с системой передачи энергии от типового модуля установки «Гамма-4» подробно описаны в [1] и [3] соответственно. В серии рабочих включений зарядное напряжение ДСФЛ составляло 0,9 МВ, что соответствует запасаемой энергии в ДСФЛ ~90 кДж. Запасенная энергия в двух генераторах Аркадьева – Маркса – ~115 кДж. Предымпульсные разрядники работали в режиме включения в конце первой положительной полу волны напряжения, сформированной ДСФЛ.

СИ присоединялся к водяной коаксиальной передающей линии с волновым сопротивлением

2,9 Ом. На рис. 3 представлен импульс напряжения, измеренный с помощью резистивного жидкостного делителя напряжения [4], установленного вдоль секционированного изолятора в воде. Во всех рабочих включениях амплитуда импульса напряжения – 2,0 МВ, амплитуда импульса тока, измеренного с помощью токового шунта [4], – 650 кА, длительность импульса на полувысоте – 70 нс с погрешностью измерений 10 %.

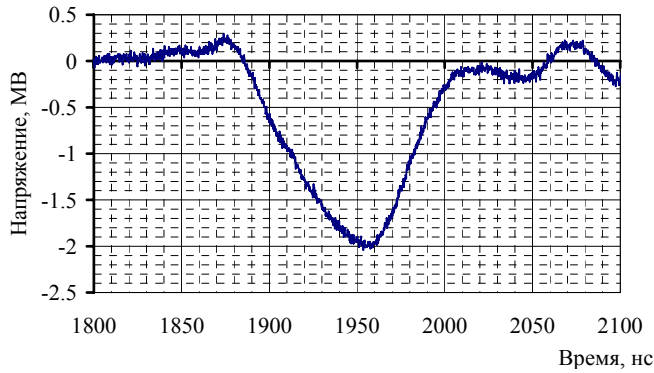


Рис. 3. Импульс напряжения на СИ

Во всех проведенных включениях ускорителя диаметр эмитирующей кромки катода был одним и тем же. В исследованиях в качестве анода применялись мишени из нержавеющей стали.

После каждого рабочего включения ускорителя по результатам обработки осциллограмм вычислялись:

– запасенная в ДСФЛ электрическая энергия $W_{ДСФЛ}$

$$W_{ДСФЛ} = C \cdot U_0^2 / 2, \text{ Дж}; \quad (3)$$

где C – электрическая емкость ДСФЛ, Ф; U_0 – напряжение зарядки ДСФЛ, В;

– мощность $P_{СИ}$ и энергия $W_{СИ}$ в узле секционированного изолятора:

$$P_{СИ} = \left(U_{СИ} - L_{СИ} \frac{dI_{ФЛ}}{dt} \right) \cdot \int \frac{dI_{ФЛ}}{dt} dt, \text{ Вт}; \quad (4)$$

$$W_{СИ} = \int P_{СИ} dt, \text{ Дж}; \quad (5)$$

где $\frac{dI_{ФЛ}}{dt}$ – производная тока с флюксометров на выходе СИ, А/с; $U_{СИ}$ – напряжение с резистивного делителя напряжения, установленного вдоль СИ в воде; $L_{СИ}$ – расчетная индуктивность СИ;

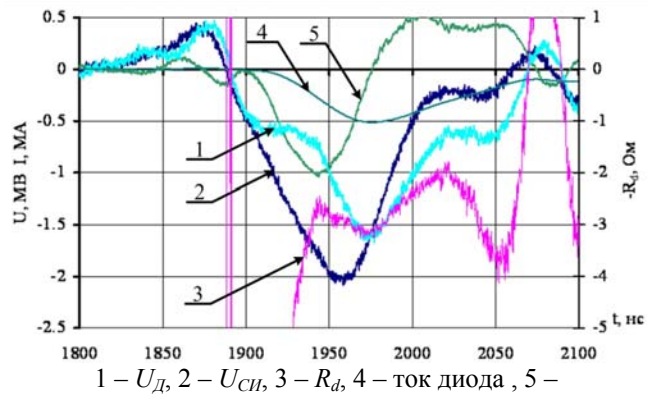
КПД передачи энергии от ДСФЛ до диода η :

$$\eta = \frac{W_{СИ}}{W_{ДСФЛ}} \cdot 100\%; \quad (6)$$

– напряжение на диоде U_D

$$U_D = U_{СИ} - L_{СИ} \cdot dI_{ФЛ} / dt, \text{ В} \quad (7)$$

На рис. 4 представлены рассчитанные по формулам (3)–(7) зависимости электрических параметров диода от времени в рабочем включении № 510.



1 – U_D , 2 – $U_{СИ}$, 3 – R_d , 4 – ток диода, 5 –

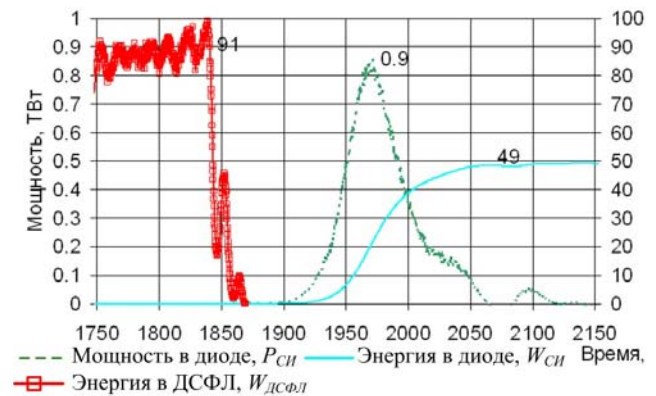


Рис. 4. Зависимости параметров диода от времени в рабочем включении № 510 ($R_d = 3,1$ Ом)

3. Полученные результаты

Для каждого зазора в диоде проводилось несколько рабочих включений ускорителя. В диоде устанавливались зазоры в диапазоне от 4 до 14 мм. Зависимость рассчитанного по формуле (7) напряжения на диоде, U_D , от зазора представлена на рис. 5. В проведенных включениях максимальное значение напряжения на диоде составило ~2,0 МВ, максимальный ток электронного пучка ~700 кА.

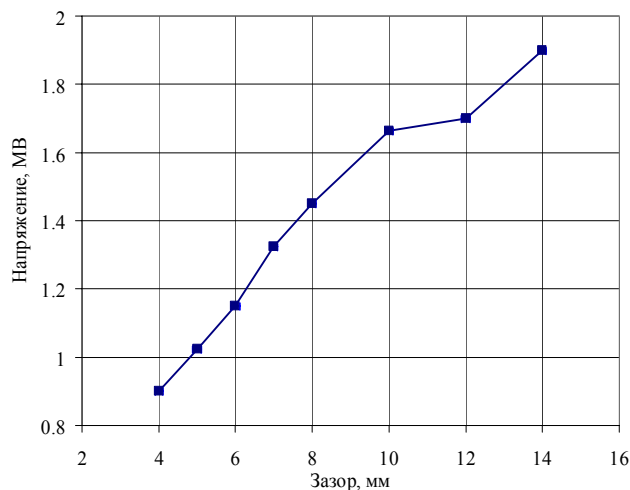


Рис. 5. Зависимость напряжения на диоде

В формуле (2) эффективный зазор d_{eff} можно представить как:

$$d_{eff} = d - v_p \cdot t, \quad (8)$$

где d – выставленный зазор между катодом и мишенью, мм; v_p – средняя скорость распространения плазмы в диоде ($(2 \div 10) \cdot 10^7$ мм/с [2,5]); t – длительность фронта импульса мощности, с.

Взяв $v_p = 5 \cdot 10^7$ мм/с, $t = 40$ нс получим из формул (2) и (8) зависимость импеданса диода R_d от зазора между катодом и мишенью d .

Рассчитанный импеданс диода для всех 8 зазоров оказывается меньше измеренного значения импеданса на ~ 1 Ом. Если ввести следующую поправку в формулу (8) для расчета d_{eff} , как это было сделано в [5]:

$$d_{eff} = d - v_p \cdot t + 3,5, \quad (9)$$

то по формуле (2) получим расчетную зависимость импеданса диода от зазора, которая достаточно хорошо совпадает с измеренными значениями. Рассчитанные данным образом зависимости импеданса диода от зазора представлены на рис. 6.

Стоит отметить, что в работе [5] поправка в расчете d_{eff} равна $-1,5$, а не $+3,5$, как в представленных результатах. Это может быть объяснено несколькими причинами. Во-первых, экспериментальные исследования диода в [5] проводились при напряжении диода от 0,4 до 0,8 МВ и токе от 100 до 500 кА. Наши экспериментальные исследования проводились при напряжении на диоде

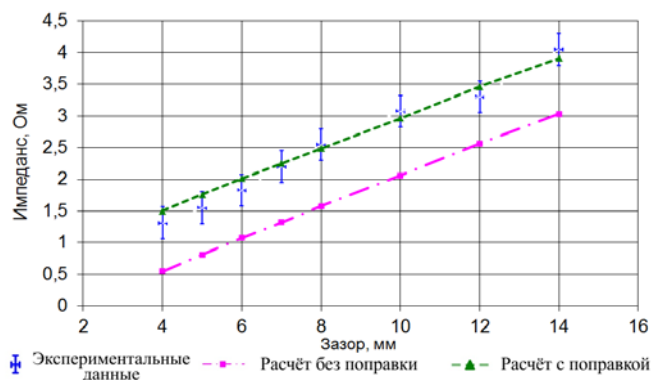


Рис. 6. Зависимость импеданса диода от зазора

от 0,9 до 2,0 МВ и токе диода от 450 до 750 кА. Во-вторых, определенное влияние на значение импеданса может оказывать положительный предимпульс напряжения в диоде длительностью ~ 40 нс и амплитудой до 0,4–0,5 МВ. В-третьих, погрешностью калибровки датчиков тока и напряжения и неидеальностью парapotенциальной модели при ее использовании для описывания режима пинч-диола.

На рис. 7 представлены полученные из экспериментальных данных зависимость КПД передачи энергии от ДСФЛ до диода, η , от зазора. Значение η составило $\sim 60\%$ ($\sim 50\%$ КПД передачи энергии от генераторов Аркадьев – Маркса до диода) для типового модуля установки «Гамма-4». В большинстве случаев для таких ускорителей электронов η достигает 20–30% [6, 7]. Энергия электронного пучка в диоде, $W_{СИ}$, изменялась в диапазоне от 30 до 50 кДж.

Выходное сопротивление ДСФЛ и волновое сопротивление водяной передающей коаксиальной линии составляет 2,9 Ом. При импедансе диода $\sim 1,5$ Ом значение η снижается до 30–35%.

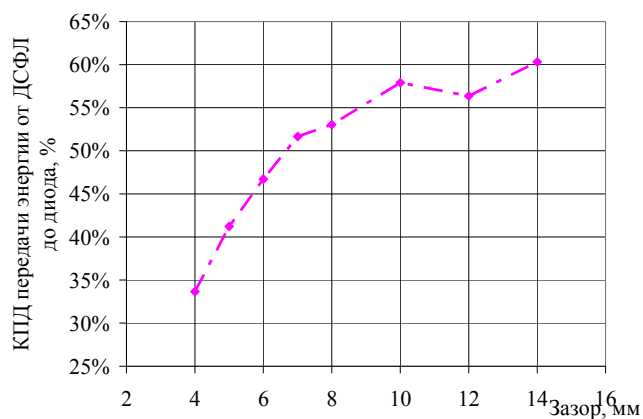


Рис. 7. Зависимость КПД передачи энергии от ДСФЛ до диода от зазора

4. Заключение

На ускорителе «Гамма-1» были проведены экспериментальные исследования электрических характеристик низкоимпедансного сильноточного вакуумного пинч-диода. Показано, что экспериментальные данные по импедансу диода хорошо совпадают с данными, полученным из парапотенциальной теории, с учетом поправки к зазору +3,5 мм.

Измеренный КПД передачи энергии от ДСФЛ к диоду при импедансе диода, близком к согласованному 2,9 Ом, составляет ~55–60 %. При импедансе диода ~1,5 Ом значение η снижается до 30–35 %.

Список литературы

1. Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф. и др. Результаты экспериментальных исследований некоторых режимов работы сильноточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» // Сборник докладов международной научной конференции «XII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии». Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010 г. с. 49–54.

2. Петин В. К., Ратахин Н. А. Предельные возможности генераторов СЖРИ на базе сильноточных ускорителей электронов. // Сборник докладов IX межотраслевой конференции по радиационной стойкости. Снежинск, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2011 г., т. 1 с. 19–26

3. Гордеев В. С., Басманов В. Ф., Гришин А. В. и др. Результаты экспериментальных исследований системы передачи энергии типового модуля установки «Гамма» // Сборник докладов XIV Харитоновских тематических научных чтений «Мощная импульсная электрофизика» 12–16 марта 2012 г. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013 г. с. 112–116.

4. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Гришин А. В. Система регистрации электрических параметров сильноточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» // Сборник докладов международной научной конференции «XII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии». Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010 г. с. 112–118.

5. Cooperstein G., and Condon J. J. Impedance characteristics of diodes operation in the self-pinch mode. // J. Appl. Phys, 1975. V. 46. № 4. P. 1535–1538.

6. Bloomquist D. D., Stinnett R. W., McDaniel D. H., Lee J. R., Sharpe A. W., Halbleib J. A., Schlitt L. G., Spence P. W., and Corcoran P. "Saturn, A Large Area X-Ray Simulation Accelerator", Proceedings of the Sixth IEEE Pulsed Power Conference, Arlington, VA edited by P. J. Turchi and B. H. Bernstein (IEEE, New York, 1987), p. 310.

7. Savage M. E., LeChien K. R., Lopez M. R., Stoltzfus B. S., Stygar W. A. «Status of the Z Pulsed Power Driver» in Proceedings of the 18th International Pulsed Power Conference, 2011, pp. 983–990.