

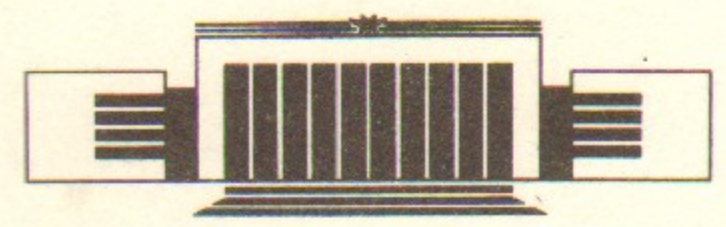


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А.П. Авроров, А.В. Аржанников, М.П. Лямзин,
С.Л. Синицкий, М.В. Юшков

**ГЕНЕРАЦИЯ МИКРОСЕКУНДНОГО РЭП
В ПЛОСКОМ ДИОДЕ
НА УСТАНОВКЕ У-2**

ПРЕПРИНТ 87-153



НОВОСИБИРСК

В развитии исследований по нагреву плазмы в открытых соле-
ноидальных ловушках представляется перспективным применение
мощных ленточных РЭП микросекундной длительности. Для иссле-
дований по генерации таких пучков в ИЯФ СО АН СССР создана
установка У-2 [1], на которой на начальном этапе эксперимен-
тальных работ осуществлялась генерация цилиндрического РЭП в
аксиально-симметричном плоском диоде с целью отработки основ-
ных узлов генератора.

Схема эксперимента приведена на рис 1. Генератор импульсно-
го напряжения (ГИН) 1, собранный по LC-схеме Фитча, подает
высокое напряжение, меняющееся по закону:
 $U_g = U_m(1 - \cos 2\pi \cdot t/T)$, $U_m < 0,8$ МВ, $T = 20$ мкс, через высоко-
вольтовый вывод 2 на коммутатор 3, заполненный элегазом при
давлении 1,5—2 ати. После срабатывания коммутатора 3 высокое
напряжение по проходному изолятору 4 передается в вакуумную
камеру к диодному промежутку 5 на цилиндрический графитовый
катод диаметром 20 см со скругленным профилем поверхности. В
качестве анода использовался графитовый коллектор калориметра
диаметром 24 см. Величина расстояния катод-анод в центре про-
межутка варьировалась от 4,7 до 8,0 см. В вакуумной камере с
помощью катушек 6 создавалось продольное магнитное поле с
напряженностью в диодном зазоре 1 Т. Распределение силовых
линий магнитного поля в районе проходного изолятора 4 было
выбрано таким, чтобы электроны, ускоряющиеся от сферического
катододержателя вдоль силовых линий этого поля, не попадали на
градиентные кольца проходного изолятора. Остаточное давление в

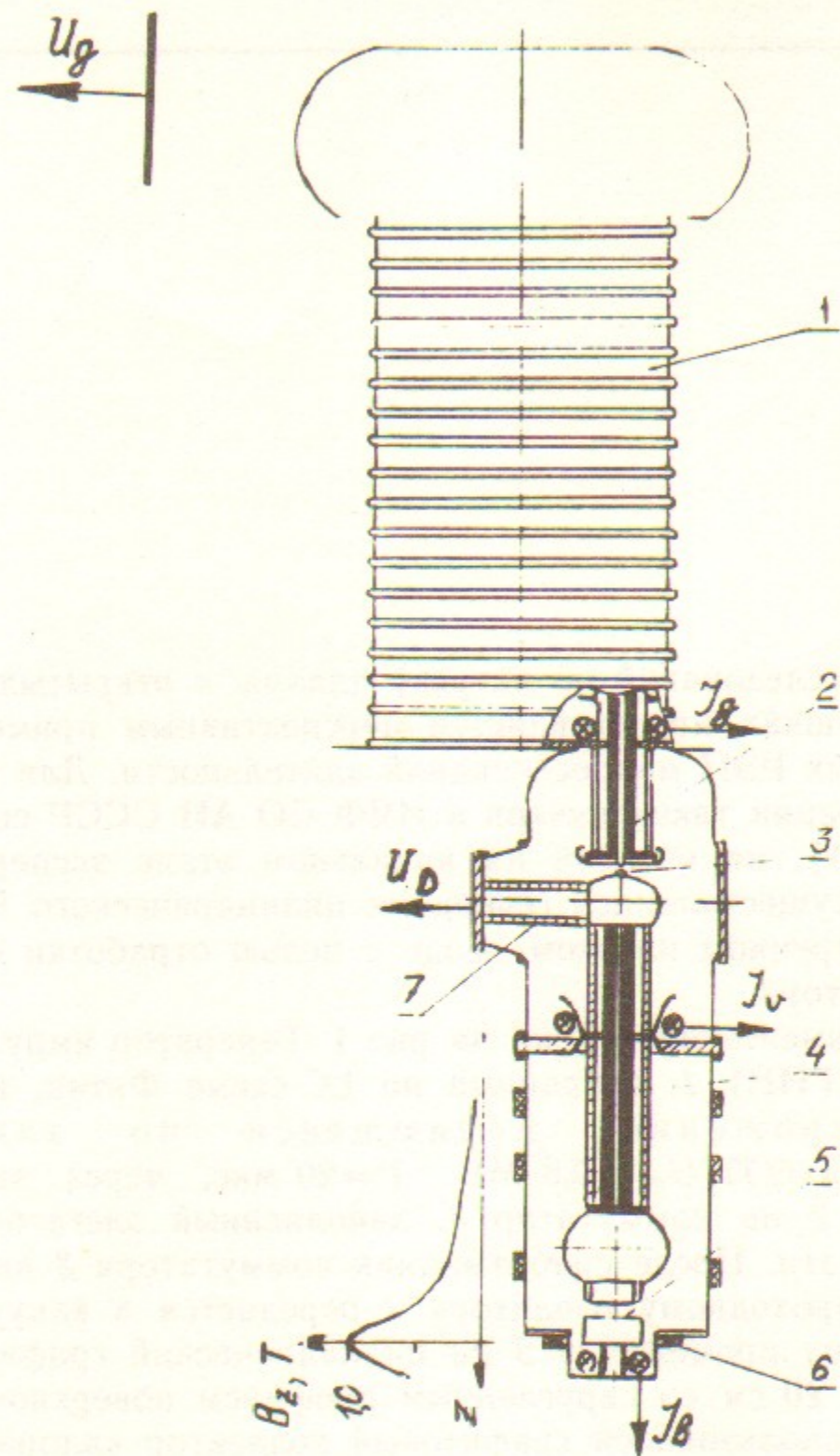


Рис. 1. Схема генерации микросекундного РЭП:

- 1—колонна ГИНа; 2—высоковольтный вывод; 3—управляемый мегавольтный коммутатор; 4—проходной изолятор; 5—ускорительный вакуумный диод; 6—катушки магнитного поля; 7—резистивный делитель напряжения.

камере в ходе экспериментов имело значение $10^{-4} \div 10^{-5}$ Торр. Напряжение U_g , формируемое ГИНа, измерялось емкостным делителем, а напряжение на выходе высоковольтного коммутатора U_d —резистивным делителем 7. Полный ток генератора I_g на входе в высоковольтный коммутатор, ток I_v , входящий в вакуумную камеру, и ток пучка I_a , приходящий на коллектор калориметра, регистрировались с помощью поясов Роговского. Определение полной энергии пучка, поглощенной в коллекторе калориметра, осуществлялось по результатам измерений прироста его температуры с помощью термодпары, а также интегрированием по времени произведения тока пучка I_a на напряжение на диоде U_d .

Для выведения генератора пучка на максимально возможные параметры были проведены серии экспериментов с постепенным повышением зарядного напряжения на конденсаторах ГИНа в следующей последовательности. Сначала, для проверки работоспособности ГИНа, проводились эксперименты с активной нагрузкой, которая устанавливалась в бак, где располагается мегавольтный коммутатор вместо проходного изолятора, и имела сопротивление $R=20$ Ом. К.п.д. передачи энергии от ГИНа в активную нагрузку составлял 75% при импедансе ГИНа $z=7$ Ом. Затем была осуществлена серия опытов по генерации пучка электронов без внешнего магнитного поля при диаметре катода $D_k=20$ см и зазоре катод-анод $a=5 \div 7$ см. После этого проводились эксперименты по получению пучка при наложении внешнего магнитного поля с катодами диаметром 20 и 26 см при постепенном увеличении катод-анодного промежутка: от $a=5$ см до $a=8$ см.

На рис. 2 представлены осциллограммы напряжения U_d на диодном промежутке и тока I_a в диоде, характеризующие его работу в условиях внешнего магнитного поля при одном напряжении зарядки конденсаторов ГИНа—42 кВ для двух различных катодов. На рис. 2,а—осциллограммы для случая, когда катод был изготовлен из мелкозернистого графита, а на рис. 2,б—из углеродного волокнистого материала. Из рисунка видно, что для этих двух катодов характер поведения тока пучка в диоде существенно отличается. Для катода из мелкозернистого графита характерен монотонный рост тока в течение всего времени пока напряжение на катоде отрицательно несмотря на то, что оно уже через 2 мкс после начала импульса начинает монотонно снижаться по абсолютной величине. Такое же поведение диодного тока во времени наблюдалось ранее в аналогичных экспериментах на установке У-1 [2], и, как показали исследования [3], проведенные на этой установке, оно

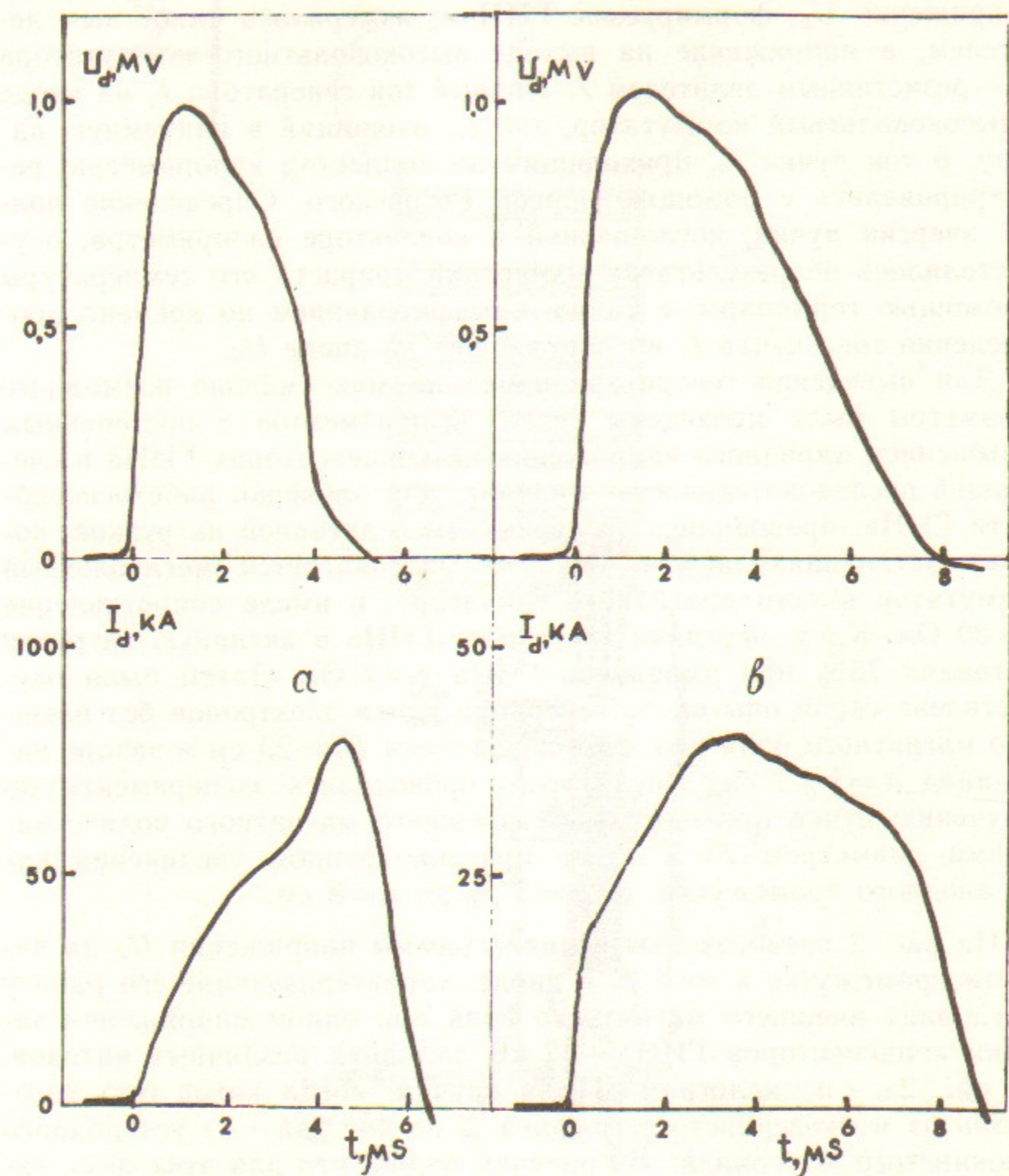


Рис. 2. Осциллограммы, характеризующие работу плоского диода для двух типов поверхности катода:
a — мелкозернистый графит, *b* — углеродный волокнистый материал. Диаметр катода — 200 мм, зазор катод-анод 70 мм, продольное магнитное поле B_z — 1,0 Т.

связано с процессами образования и движения плазмы в катод-анодном промежутке. Замена материала катода на волокнистый графит приводит к тому, что ток диода при таком катоде не имеет монотонного роста во времени, а уменьшается при спаде напряжения на диодном промежутке (см. рис. 2, *b*).

Различие поведения во времени сопротивления диодного промежутка для этих двух типов поверхности катода демонстрирует рис. 3. На этом рисунке нанесены экспериментально измеренные j_d

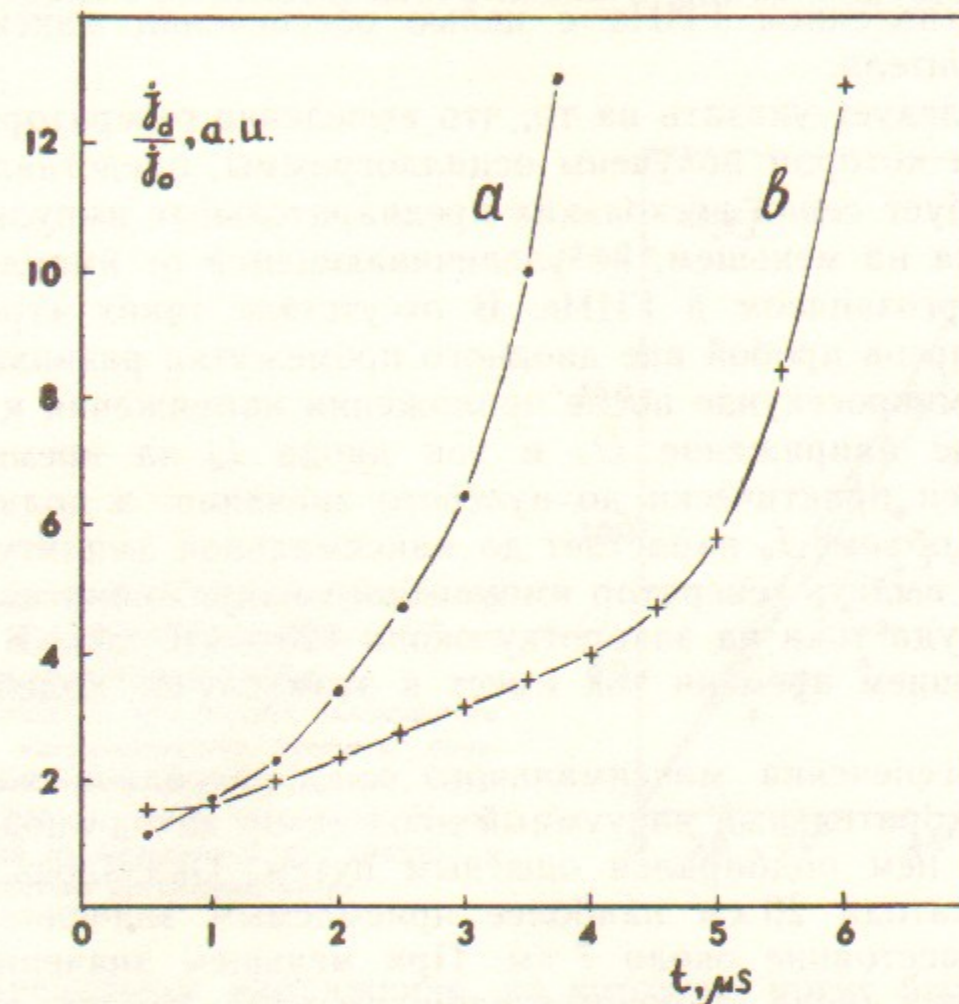


Рис. 3. Поведение во времени сопротивления диодного промежутка для двух типов поверхности катода.

значения плотности тока в диоде, отнесенные к расчетному значению плотности электронного тока в диоде j_0 , которое было вычислено в предположении об отсутствии ионов в вакуумном промежутке. Расчеты плотности электронного тока приводились по формуле взятой из работы [4], исходя из значения зазора в диоде вблизи его оси и напряжения на катоде, отсчитываемого по осциллограмме U_d для данного момента времени. Экспериментальное значение плотности тока определялось делением измеренного тока пучка в диоде на сечение пучка в плоскости катода. Видно, что для катода, изготовленного из мелкозернистого графита, сопротив-

ление диода падает в десять раз по отношению к расчетному за интервал времени около 4 мкс. Что касается катода покрытого волокнистым графитом, то за это время сопротивление диода уменьшается не более чем в два раза. Поскольку сопротивление диода за время $t \approx 5$ мкс в последнем случае изменяется не столь значительно, то открывается возможность подбором геометрических размеров диода добиваться согласования его сопротивления с волновым сопротивлением ГИНа с целью обеспечения максимального к.п.д. ускорителя.

Здесь следует указать на то, что выведение генератора пучка в режим, при котором получены осциллограммы, представленные на рис. 2, требует серии нескольких предварительных импульсов генерации пучка на меньшем, но увеличивающемся от импульса к импульсу энергозапасом в ГИНе. В отсутствие таких «тренировочных» импульсов пробой вне диодного промежутка развивается уже на первой микросекунде после приложения напряжения к диоду. В этом случае напряжение U_d и ток диода I_d за время 0,1 мкс уменьшаются практически до нулевого значения, а полный ток в вакуумном объеме I_v нарастает до максимальной амплитуды, которую может выдать генератор импульсного напряжения на короткую (амплитуда тока на короткую около 120—140 кА). В дальнейшем с течением времени ток имеет в этом случае колебательный характер.

Для обеспечения максимального к.п.д. передачи энергии от ГИНа в ускорительный вакуумный диод зазор катод-анодного промежутка в нем подбирался опытным путем. Оказалось, что для диаметра катода 20 см наиболее приемлемым значением зазора является расстояние около 7 см. При меньшем значении зазора сопротивление диода становится слишком мало, так что разрядный ток ГИНа носит колебательный характер и значительная доля энергии остается в его реактивных элементах. С другой стороны, при зазоре, большем 7 см, токи электронных утечек в вакууме с металлических колец проходного изолятора и ток, протекающий внутри него по проводящему раствору, дают в сумме величину соизмеримую с током пучка в диоде, который в этом случае имеет несколько меньшее значение. Поскольку при пониженном токе возрастает длительность генерации пучка, то в итоге оказывается, что заметная часть энергии, запасенной в ГИНе, рассеивается в виде активных потерь вне ускорительного диода. Таким образом, как при увеличении, так и при уменьшении диодного зазора относительно оптимального значения происходит снижение к.п.д. передачи энергии от ГИНа в пучок.

О значении к.п.д. ускорителя при величине зазора катод-анод, близкой к оптимальному, можно судить по зависимости энергосодержания пучка (Q) от квадрата напряжения (U_C^2) зарядки конденсаторов ГИНа, которая представлена на рис. 4. В представленной на рисунке зависимости $Q(U_C^2)$ отображены значения энергосодержания пучка Q , которые были определены по результатам измерений прироста температуры калориметра при поглощении в нем пучка. Энергия, накопленная в конденсаторах ГИНа перед началом генерации импульса, изображена в форме заштрихованной

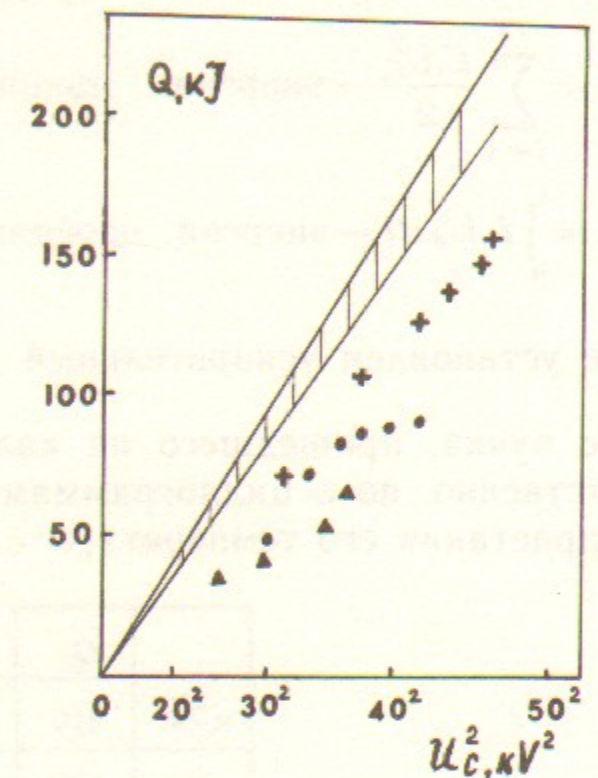


Рис. 4. Зависимость энергосодержания пучка Q от квадрата напряжения U_C^2 на конденсаторах ГИНа:
 +, • — для катода из углеродного волокнистого материала и мелкозернистого графита, соответственно. Магнитное поле — $B_z = 1,0$ Т, диаметр катода 200 мм, зазор катод-анод 70 мм.
 ▲ — для катода из мелкозернистого графита в отсутствие магнитного поля.

полосы. Предельное напряжение, до которого могут быть заряжены конденсаторы, согласно техническим условиям, имеет значение 50 кВ, и предельный энергозапас в конденсаторах ГИНа, исходя из этого, оценивается величиной 250 кДж. Из рисунка видно, что для катода диаметром 20 см, изготовленного из мелкозернистого графита, эффективность передачи энергии в пучок начинает резко снижаться при напряжении зарядки конденсаторов ГИНа более 35 кВ. Это связано с тем, что при таком зазоре ток диода на начальной стадии генерации РЭП недостаточно велик и сказываются токи паразитных утечек, а затем он резко нарастает, и в момент времени около 5 мкс происходит закорачивание диода так, что часть энергии остается в реактивных элементах генератора пучка. Переход к катоду с волокнистым покрытием позволил поднять на-

чальный ток диода и устранить быстрый спад сопротивления диода во времени. В результате этого улучшилось согласование сопротивления диода с волновым сопротивлением ГИНа на большом отрезке времени, а также снизилась величина потерь энергии из-за утечек в вакуумном объеме. В итоге это позволило довести к.п.д. ускорителя до 70—75% при напряжении зарядки конденсаторов ГИНа U_C вплоть до 46 кВ. Более подробное сопоставление значений энергозапаса в импульсе, генерируемом в различных частях ускорителя У-2, для одного из конкретных опытов при напряжении зарядки $U_C = 46$ кВ представлено в таблице. Здесь:

$$Q_C = \sum_{i=1}^{72} \frac{C_i U_{Ci}^2}{2} - \text{энергия, накопленная в конденсаторах ГИНа;}$$

$$Q_v = \int_0^{t_b} I_v U_d dt - \text{энергия, переданная от ГИНа в вакуумный объем,}$$

где установлен ускорительный диод; $Q_d = \int_0^{t_b} I_d U_d dt$ и Q — энергозапас пучка, пришедшего на калориметр, который определен, соответственно, по осциллограммам I_d , U_d и по результатам измерений подрастания его температуры с помощью термопары.

	Q_C	Q_v	Q_d	Q
кДж	210	180	170	155
%	100	86	81	74

Видно, что два независимых метода измерений показывают энергозапас пучка, пришедшего на калориметр, по крайней мере, не меньший чем 150 кДж.

Таким образом, экспериментально показана возможность достижения высокого ($\approx 75\%$) к.п.д. передачи энергии от ГИНа в пучок с длительностью до 10 нс и энергозапасом около 150 кДж.

В заключение авторы выражают признательность Д.Д. Рютову за постановку задачи и постоянное внимание к развитию работы, В.С. Койдану и М.А. Щеглову за полезные советы и обсуждения. Мы глубоко благодарны Р.П. Зоткину, В.А. Капитонову, В.С. Николаеву, А.В. Смирнову, В.К. Шарарову, принимавшим активное участие в проектировании и сооружении установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Aurorov A.P. et al. Proc. of XI Intern. Conf. on Plasma Phys. and Control. Nuclear Fusion Res., Kyoto, 1986, IAEA, Vienna (1987), 323.
2. Воропаев С.Г., Лебедев С.В., Чикунов В.В., Щеглов М.А. Письма в ЖТФ, 1985, т.11, вып.5, с.267.
3. Бурмасов В.С., Воропаев С.Г., Добрицкий А.Л., Лебедев С.В., Щеглов М.А. Препринт ИЯФ СО АН СССР 85-14. Новосибирск, 1985.
4. Брейзман Б.Н., Рютов Д.Д., Ступаков Г.В. Известия высших учебных заведений. Физика, №10, 1979, с.7.

*А.П. Авроров, А.В. Аржанников, М.П. Лямзин,
С.Л. Сеницкий, М.В. Юшков*

**Генерация микросекундного РЭП
в плоском диоде
на установке У-2**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 17 марта 1987 г.
Подписано в печать 10.11.1987 г. МН 08446
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,1 печ.л., 0,9 уч.-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 153

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*