

44

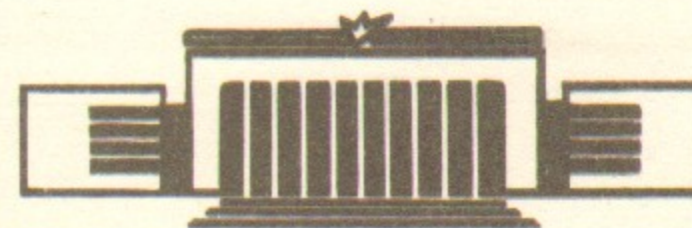


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

С.Г.Воропаев, В.С.Койдан, С.В.Лебедев
В.С.Николаев, В.В.Чикунев, М.А.Щеглов

**МОЩНЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ
ПУЧОК МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ
ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ**

ПРЕПРИНТ 83—72



НОВОСИБИРСК

С.Г.Воропаев, В.С.Койдан, С.В.Лебедев,
В.С.Николаев, В.В.Чикунов, М.А.Щеглов

МОЩНЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК
МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ НАГРЕВА
ПЛАЗМЫ

АННОТАЦИЯ

В работе сообщается о результатах экспериментов по генерации релятивистского электронного пучка (РЭП) микросекундной длительности с полной выделенной в диоде энергией до 85 кДж и энергией в выведенном пучке 55 кДж. Достигнута длительность импульса 5 нс, максимальный ток около 40 кА, плотность тока $\approx 200 \text{ А/см}^2$, энергия электронов до 750 кэВ. РЭП формировался в квазиплоском диоде в продольном магнитном поле с напряженностью до 5 кЭ. Исследовано распределение тока пучка по сечению сцинтилляционными коллекторами и рентгеновской камерой-обскурой. Показано наличие макроскопической однородности пучка; вместе с тем зарегистрирована его характерная мелкокомпо- штабная микроструктура. С помощью ЭОП проведены съемки свечения плазмы, образующейся на катоде и аноде во время генерации пучка.

HIGH-POWER MICROSECOND RELATIVISTIC ELECTRON BEAM
FOR PLASMA HEATING

S.G.Voropaev, V.S.Koidan, S.V.Lebedev, V.S.Nikolaev,
V.V.Chikunov and M.A.Shcheglov

Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, USSR

ABSTRACT

The paper reports the experimental results on the generation of a microsecond relativistic electron beam (REB) at a total energy of 85 kJ released in the diode and at an energy of 55 kJ in the extracted beam. The achieved pulse duration is 5 μ s, the maximum current is about 40 kA, the current density is about 200 A/cm², and the electron energy is up to 750 keV. The REB has been formed in a quasi-plane diode with a 5 kOe longitudinal magnetic field. The beam current distribution over the cross section has been measured by means of segmented collectors and an X-ray pin-hole camera. It has been shown that the beam is microscopically homogeneous, but its small-scale microstructure has been observed as well. The diode plasma emission during the beam generation has been detected with an image converter tube.

Для нагрева плазмы в системах с магнитным удержанием могут быть эффективно использованы мощные релятивистские электронные пучки (РЭП) микросекундной длительности с энергозапасом в десятки и сотни кДж [1]. Имеется в виду, что пучок с относительно небольшой плотностью тока будет получаться в плоском, либо бесфольговом диоде в ведущем магнитном поле, после чего будет подвергаться магнитной компрессии с целью получения плотности тока до нескольких кА/см².

В настоящей работе сообщается о получении на установке У-1 РЭП микросекундной длительности с энергозапасом в выведенном из диода пучке 55 кДж, а также приводятся результаты изучения характеристик пучка. Сведения о предварительных экспериментах на этой установке содержатся в публикациях [2,3]. По сравнению с предварительными экспериментами в конструкцию генератора импульсных напряжений (ГИН) LC-типа [4] были внесены значительные изменения, в частности, вместо ранее применяемого водооленочного высоковольтного вывода (см [4]) был использован вывод с газовой изоляцией, что позволило работать с существенно большим начальным энергозапасом в ГИНе (до 150 кДж).

Схема эксперимента приведена на рис.1. Высоковольтный импульс от ГИНа подавался на квазиплоский графитовый катод 5. Диаметр катода в экспериментах менялся от 10 до 18 см, а расстояние между катодом и анодом от 3 до 10 см. Анодом, как правило, служила алюминиевая фольга 6 толщиной 9-30 мкм. В качестве коллектора пучка обычно использовался графитовый calorimeter диаметром 20 см. Ток на calorimeter измерялся малоиндуктивным шунтом или поясом Роговского. Для измерения распределения тока пучка по сечению применялись различные секционированные коллекторы. Напряжение на катоде измерялось емкостным I2, а также резистивным I4 делителями. Ток диода и полный ток генератора в вакуумной камере измерялись соответственно поясами 7, I3. Тормозное излучение релятивистских электронов регистрировалось сцинтилляционным детектором 9, перед которым стоял свинцовый фильтр толщиной 0,8 см, и камерой-обскурой I0. Свечение в диоде регистрировалось ЗОПом II. В вакуумной камере создавалось продольное магнитное поле с напряженностью в диодном зазоре до 5 кЭ. Остаточное давление

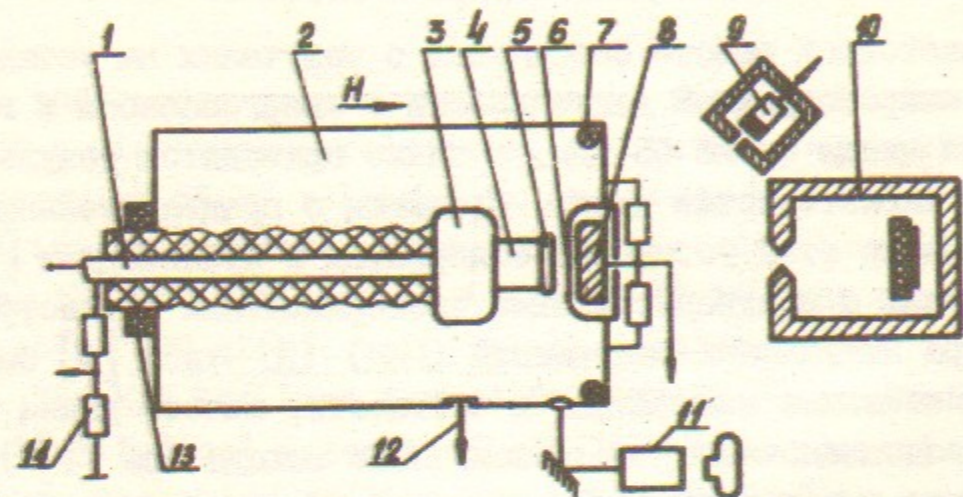


Рис.1. Схема эксперимента: 1 - высоковольтный ввод; 2 - вакуумная камера, 3 - экранирующий электрод; 4 - шток; 5 - катод; 6 - анодная фольга; 7 и 13 - пояса Роговского; 8 - калориметр; 9 - сцинтилляционный детектор; 10 - камера-обскура; 11 - ЭОЦ; 12 и 14 - емкостный и резистивный делители.

составляло $2-5 \cdot 10^{-5}$ Тор.

На рис.2 приведены типичные осциллограммы напряжения на диоде U_d , тока пучка I_n за анодной фольгой, тока диода I_d , а также сигнала детектора тормозного излучения I_γ . Эти осциллограммы получены при зазоре между катодом и анодной фольгой $d = 7.8$ см и диаметре катода 18 см. Напряжение на катоде достигает в максимуме 750 кВ. Длительность импульса напряжения по основанию составляет 5 мкс. Ток пучка на калориметр составлял в максимуме 38 кА. Наличие пучка релятивистских электронов подтверждается сигналом детектора тормозного излучения. Полная энергия пучка за импульс после прохождения анодной фольги определялась по показаниям калориметра и по интегралу $\int I_n U_d dt$. Определение энергии пучка последним способом корректно, если энергия электронов в течение импульса соответствует приложенному напряжению. Для проверки этого обстоятельства было проведено независимое определение энергии пучковых электронов. Это было сделано путем сравнения величины токов за фольгами различной толщины (от 30 мкм до 500 мкм) с расчетными значениями токов, полученными в предположении, что мгновенная энергия электронов пучка совпадает с величиной приложенного напряжения. Было получено хорошее совпадение форм расчетной и экспериментальной осциллограмм тока, что свидетельствует о том, что электроны пучка за тонкой фольгой действительно имеют энергию, равную приложенному напряжению^{*)}. В результате полная энергия пучка за анодной фольгой, определенная по показаниям калориметра и по интегралу $\int I_n U_d dt$, составила (55 ± 5) кДж.

Важным параметром установки в целом является коэффициент передачи энергии от ГИНа в нагрузку (вакуумный диод) и, в конечном счете, в пучок. В связи с этим был изучен баланс токов в различных точках установки. Было установлено, что часть тока диода I_d обусловлена эмиссией электронов с боковой поверхности электрода 3 (рис.1) вперед, вне апертуры калориметра. Величина этого тока утечки достигает 30% I_d при максимальном напряжении на диоде, а уносимая им энергия составляет 15 кДж. Установлено также, что часть полного тока генератора

*) За исключением, возможно, самой заключительной, низковольтной части импульса, которая практически не вносит вклада в полную энергию пучка.

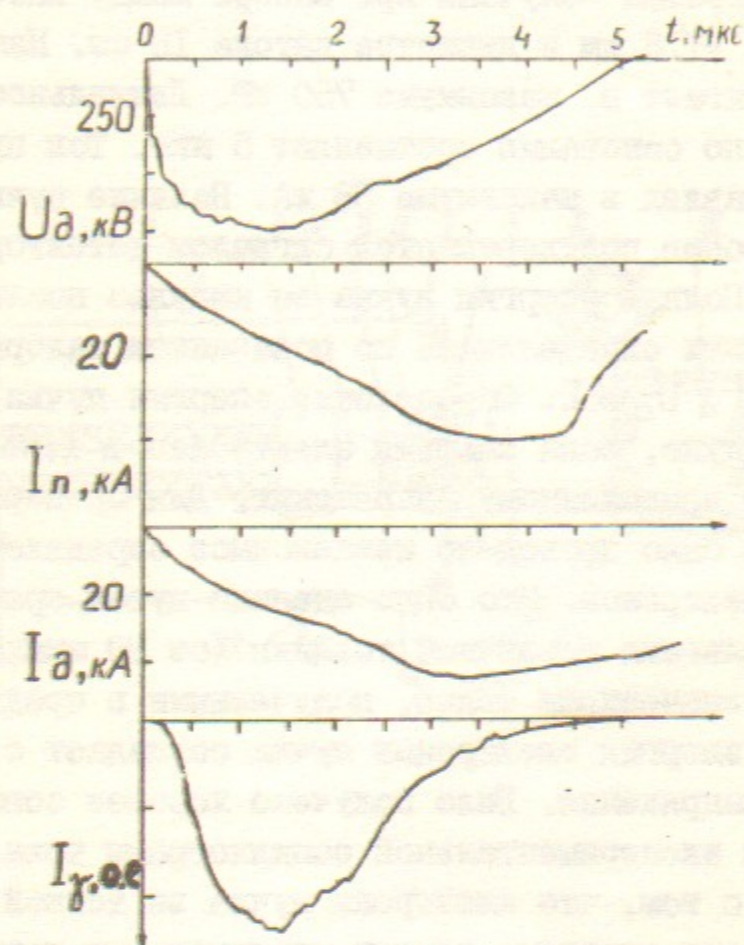


Рис.2 . Осциллограммы одного из типичных выстрелов.

в вакуумной камере I_{Γ} обусловлена эмиссией электронов с электрода 3 назад, вдоль силовых линий магнитного поля. Величина тока утечки назад достигает 25% I_{Γ} , а уносимая при этом энергия составляет также 15 кДж. Обнаруженные "утечки" тока наблюдались при напряженности электрического поля на экранном электроде 3 (рис.1) ≈ 80 кВ/см.

Таким образом, в апертуру коллектора поступает 65% Q_{Γ} , что составляет 55 кДж, а полная энергия, выделяющаяся в диоде за время импульса, ($Q_{\Gamma} = \int I_{\Gamma} U_a dt$) - 85 кДж (при полном энергозапасе в ГИНе - 150 кДж). Для сравнения укажем, что из опубликованных к настоящему времени работ по получению РЭП микросекундной длительности (см. работы [5-13] и библиографию в них) наибольшее значение энергии, выделяющейся в диоде (около 75 кДж) получено в работе [13] при напряжении на диоде 4,3 МВ (эта работа была ориентирована на получение импульсов γ -излучения и в диоде отсутствовало внешнее магнитное поле).

Важной характеристикой пучка является степень его однородности. Измерения распределения тока пучка по сечению проводились с помощью коллекторов нескольких типов, а также камерой-обскурой. Макроскопическая однородность измерялась секционированными коллекторами, состоящими либо из четырех одинаковых сегментов, либо из четырех колец равной площади (33 см²). Для определения локальной однородности проводилась регистрация электронов, прошедших через коллимирующие отверстия диаметром $d_k = 0,3 + 3$ мм в коллекторе, расположенном вплотную к анодной фольге. Эти электроны поглощались в микроколлекторах и либо регистрировались пунтами, либо заряжали конденсаторы, напряжение с которых считывалось после импульса (в этом случае определялось интегральное за импульс распределение плотности заряда по сечению).

На рис.3 показано радиальное распределение плотности тока $j(R)$ в моменты времени 0,5 и 1,2 мкс, полученное в типичном импульсе (гистограмма), и плотности заряда $q(R)$ (точки). Указанный для $q(R)$ разброс связан с усреднением за несколько импульсов по четырем каналам для каждого радиуса. В течение импульса распределение тока по сечению несколько перестраивается, причем так, что относительный вклад центральной части возрастает. В целом, проведенные измерения показывают

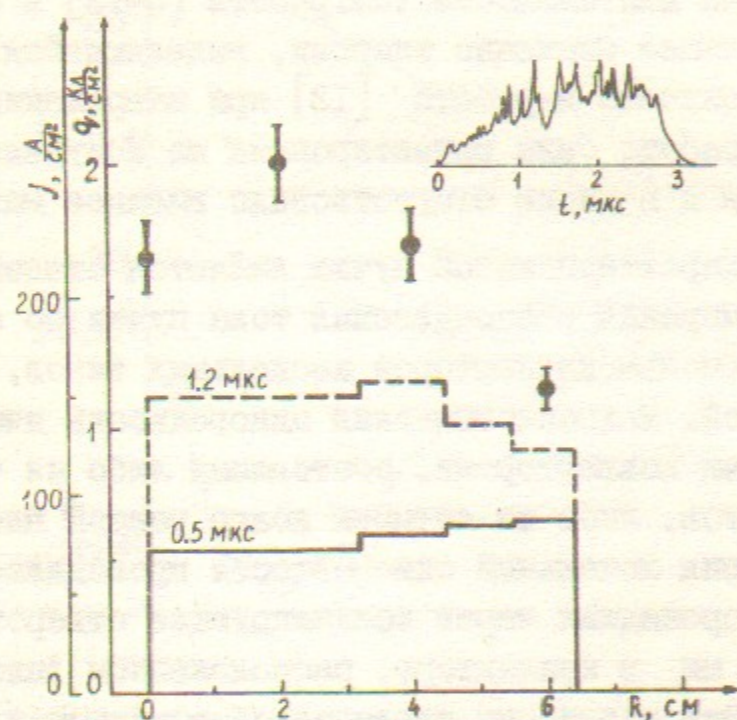


Рис.3 Распределение плотности тока и заряда по сечению пучка. В правом верхнем углу — типичная осциллограмма с одного из микроколлекторов

хорошую азимутальную и радиальную макроскопическую однородность пучка. Это подтверждается также и фотографиями, полученными камерой-обскурой. При этом тормозное излучение электронов проходило через фильтр, отсекающий γ -кванты низких энергий, так что основной вклад в изображение давало излучение электронов с энергиями несколько сотен кэВ.

Ток на секционированные коллекторы по форме совпадает с полным током пучка. При локальных же измерениях микроколлекторами форма тока меняется, осциллограммы имеют сильно изрезанную форму (см. рис.3), Амплитуда всплесков на сигнале может даже превышать среднюю величину тока, а их длительность меняется от 10 до сотен нс. Приведенная на рис.3 осциллограмма получена при диаметре коллиматора $d_k = 1$ мм; при увеличении диаметра коллиматора полное количество всплесков на осциллограмме уменьшается. Характер полученных сигналов свидетельствует о том, что в действительности пучок имеет своеобразную мелкомасштабную структуру.

Поскольку в целом распределение тока пучка по сечению макроскопически однородно, можно провести сравнение экспериментально измеряемого тока с расчетным, выполненным для вакуумного диода с квазишпоровым катодом. В начале импульса работа диода может быть описана чисто электронным режимом, но уже к $t \approx 1$ мкс измеряемая величина тока становится больше расчетной и не может быть объяснена даже биполярным режимом работы диода, т.е. наличием эмиссии ионов с анодной фольги. Нарастание тока связано, по-видимому, с заполнением диода плазмой. Расчет изменения эффективного зазора от времени показывает, что скорость его уменьшения составляет $V = (1,7 + 2,6) \cdot 10^6$ см/с.

Для регистрации свечения плазмы, образующейся в диоде, производилась электронно-оптическая съемка диодного промежутка с помощью ЭОП, работающего в однокадровом режиме. Съемка производилась в направлении, перпендикулярном оси диода (см.рис.1). Длительность экспозиции в данной серии экспериментов составляла 0,1–0,5 мкс. На рис.4 приведены фотографии свечения в диодном промежутке, полученные в одинаковых условиях в различные моменты времени, а также, для сравнения, фотография диодного промежутка в отсутствие пучка. Из этих фотографий видно, что в процессе работы диода возникает как прикатодное, так и при-

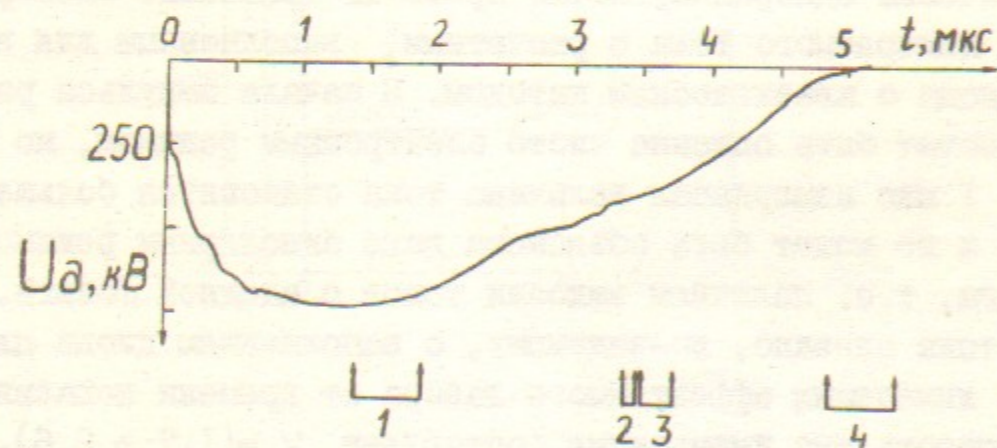
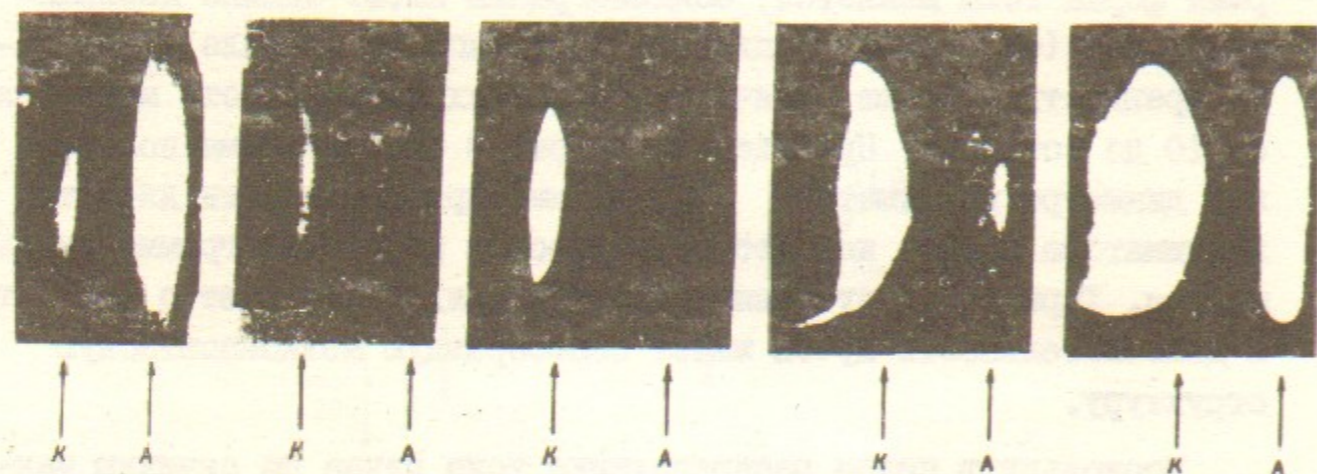


Рис.4. Свечение диода в различные моменты времени:
 1 - фотография диода без пучка; 2 - 1,4 мкс
 после начала пучка (экспозиция 0,5 мкс);
 3 - 3,5 мкс (0,1 мкс); 4 - 3,6 мкс (0,25 мкс);
 5 - 4,9 мкс (0,5 мкс).

анодное свечение, причем у анода свечение возникает существенно позже, чем вблизи катода. Отметим, что в течение большей части импульса регистрируемое свечение довольно однородно вдоль поверхности катода, в заключительной же части граница свечения неоднородна. Характерно, что в течение всего времени существования пучка свечение сосредоточено вблизи электродов. Заметим, впрочем, что само по себе это обстоятельство не исключает наличия более редкой и не регистрируемой поэтому ЭОПом плазмы, граница которой находится дальше от поверхности электрода, чем граница свечения, и которая является реальной эмиттирующей поверхностью.

Таким образом, проведенные эксперименты позволили получить пучок с длительностью импульса 5 мкс, энергией электронов до 750 кэВ, энергозапасом (55 ± 5) кДж при энергии, выделенной в диоде, около 85 кДж. Установлено наличие макроскопической однородности пучка по сечению с одновременным наличием характерной мелкомасштабной структуры. Достигнутые величины тока (40 кА) и его плотности (до 200 А/см^2) при малом угловом разбросе (при инжекции через тонкую анодную фольгу) позволяют провести эксперименты по сжатию пучка в $10 + 20$ раз, что даст пучок с плотностью тока до нескольких кА/см², пригодный для использования в экспериментах по нагреву плотной (10^{15} см^{-3}) плазмы (см [14]).

В заключение авторы считают своим долгом выразить глубокую благодарность Д.Д.Рятову за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения результатов.

Л и т е р а т у р а

1. Рятков Д.Д. - Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез, 1978, вып. I-2, с.96.
2. Лебедев С.В., Чикунов В.В., Щеглов М.А. - Письма в ЖТФ, 1982, т.8, с.693.
3. Лебедев С.В., Чикунов В.В., Щеглов М.А. - Сб.: Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике, Томск, 1982, т. I, с.194.
4. Астрелли В.Г., Воробьев В.В., Лагунов В.М., Николаев В.С., Щеглов М.А. - Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез, 1982, вып. I(9), с.19.
5. Friedman M., Ury M. - Rev. Sci. Instrum., 1972, v. 43, p. 1659.
6. Бугаев С.П., Касимов Г.М., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. - Письма в ЖТФ, 1973, т.18, с.82.
7. Schneider R., Stallings C., Cummings D. - J. Vac. Sci Technol., 1975, v. 12, p. 119.
8. Martin T.H., Clark R.S. - Rev. Sci. Instrum., 1976, v. 47, p. 460.
9. Глейзер И.З., Диденко А.Н., Сметанин В.И., Усов Ю.П., Цветков В.И., Штанов А.А. - Тр. У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1976, М., 1977, т.2, с.265.
10. Бабнели М.В., Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Долгачев Г.И., Мижирницкий В.И., Пасечников А.М., Скоршшин Б.А. - Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез, 1980, вып. 2(6), с.29.
11. Борисов В.И., Гусев О.А., Иванов Б.А., Ковалев В.Г., Марков В.Б., Меллех Е.М., Павлов Е.П., Печерский О.П., Ткаченко К.И., Федоров Ф.А. - Тр. II Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, Ленинград, 1981, т.3, с.60.
12. Воронин В.С., Захаров С.М., Казанский Л.Н., Пикуз С.А. - Письма в ЖТФ, 1981, т.7, с.1224.
13. Дьянков В.С., Лаврентьев Б.Н., Мунасыпов Р.Н. - ЖТФ, 1982, т.52, с.43
14. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Mekler K.I., Rogozin A.I., Vyacheslavov L.N. - Proc. of the 3rd Inst. Topical Conf. on High Power Electron and Technology, Novosibirsk, 1979, v. 1, p. 29.

С.Г.Воропаев, В.С.Койдан, С.В.Лебедев,
В.С.Николаев, В.В.Чикунов, М.А.Щеглов

МОЩНЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК
МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ

Препринт
№ 83-72

Работа поступила - 8 апреля 1983 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 15.07-1983 г. МН 17641
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.0,6 печ.л., 0,5 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 72.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90