

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ СИЛЬНОТОЧНОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Ю.М.Горбулин, Д.М.Злотников, Ю.Г.Калинин,
В.А.Скорюпин, А.Ю.Шашков

Представлены эксперименты по измерению мгновенной плотности тока в диоде сильно-точного ускорителя релятивистских электронов. Измеренная плотность тока достигала 80 MA/cm^2 , что на порядок превышает усредненную за время импульса; при этом плотность мощности достигала $6 \cdot 10^{13} \text{ Вт/cm}^2$.

В работе ¹ сообщалось о фокусировке релятивистских электронных пучков (РЭП) в диодах сильноточных электронных ускорителей. При этом диаметр фокального пятна определялся по его изображению в жестком рентгеновском излучении, сфотографированному с помощью камеры-обскуры за все время импульса. Для исследования динамики пучка в диоде и правильной интерпретации процесса нагрева анодной фольги, в частности, роли аномального торможения электронов из-за их замагниченности, важно знать временные характеристики электронного пучка. Ниже приведены результаты исследований динамики сфокусированного РЭП, важнейшим из которых является регистрация потоков мощности $\sim 6 \cdot 10^{13} \text{ Вт/cm}^2$ при плотностях тока до 80 MA/cm^2 . Эти данные получены с помощью фотографирования фокального пятна в жестком рентгеновском излучении с временным разрешением. В экспериментах применялся электронно-оптический преобразователь (ЭОП), выполненный по схеме прямого переноса изображения. Его катодом служила микроканальная пластина (МКП), чувствительная к рентгеновским квантам с энергией в десятки и сотни кэВ; с помощью камеры-обскуры на ней строилось рентгеновское изображение фокального пятна. Эта же МКП служила одновременно и усилительным элементом.

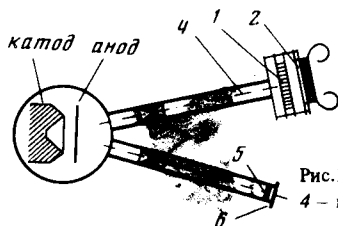


Рис.1. Схема эксперимента: 1 – МКП, 2 – экран, 3 – камера-обскура, 4 – ковровое окно ЭОП, 5 – γ -фильтр, 6 – пленка РМ-5-1

Опыты проводились на установке "Мираж" ^{2,3}, в них использовался катод, аналогичный описанному в ¹. При напряжении на диоде 800 кВ ток в режиме фокусировки достигал 200 кА, при полной длительности импульса – 90 нсек. Схема эксперимента приведена на рис.1. Время экспозиции рентгеновского кадра $\cong 5$ нсек определялось эффективной длитель-

ностью импульса напряжения, приложенного между МКП и экраном ЭОПа. Разрешающая способность тракта по объекту, составляющая 400 мкм, определялась эффективным отверстием и углом раствора свинцовой камеры-обскуры.

Интегральные по времени измерения плотности тока пучка проводились с помощью камеры-обскуры и рентгеновской пленки типа РМ-5-1. Спектральная пропускающая характеристика трактов позволяла регистрировать излучение с энергией квантов $\geq 40 - 60$ кэВ.

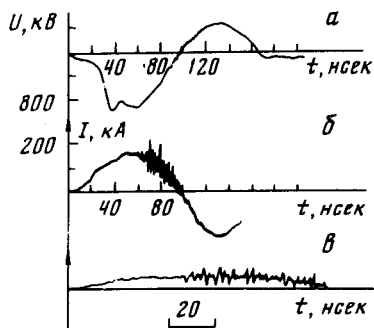
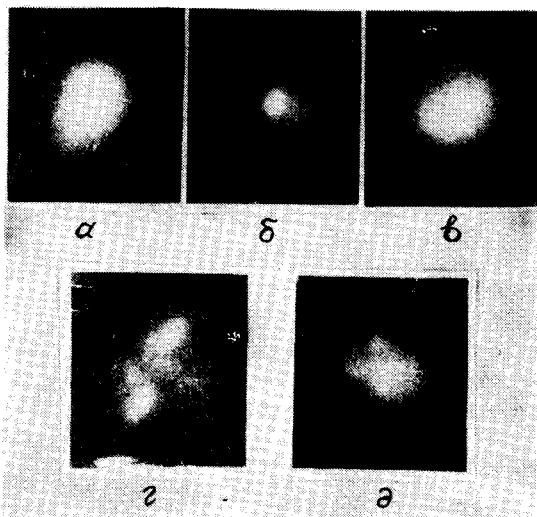
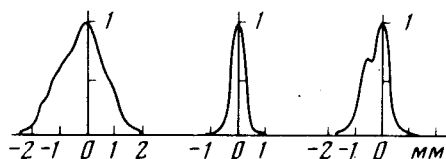


Рис.3. Характерные осциллограммы напряжения на диоде (а) и тока (б и в) ускорителя. На (в) ток диода снят с более высоким временным разрешением

Рис.2. Фотография фокального пятна электронного пучка в γ -излучении и распределения его интенсивности: а – интегральная по времени, б – через 45 нсек от начала тока, в – через 70 нсек от начала тока, г, д – разбиение тока на отдельные нити

| | j_{max} [MA · cm ⁻²] | | |
|---------------|-------------------------------------|---------|---------|
| τ (нсек) | 5 ÷ 10 | 50 ÷ 55 | 70 ÷ 75 |
| а | 63 | 80 | 6,3 |
| б | 6,7 | 5,3 | 5,0 |

а – Значение плотности тока диода в разные моменты времени.

б – Значение усредненной по времени плотности тока в соответствующих опытах.

На рис.2 представлены интегральная (а) и мгновенные рентгеновские фотографии (б, в) фокального пятна электронного пучка в различные моменты времени, а также соответствующие кривые распределения интенсивности γ -излучения. Видно резкое отличие полуширины кривой интенсивности, соответствующей интегральной по времени фотографии от измеренной за 5 нсек. Предполагая, что спектр рентгеновского излучения по размеру пятна фокусировки одинаков, и что ток в диоде в основном переносится электронами, оценивалось значение плотности тока электронного пучка в фокальном пятне. При этом мгновенная плотность тока определялась по значению тока в момент измерения, а интегральная – по его максимальному значению; в качестве площади использовалась площадь фокального пятна, определяемая полувысотой интенсивности. Примеры значений плотности тока приведены в таблице, из которой следует, что мгновенное значение плотности тока до некоторого момента вре-

мени процесса превышает плотность тока, измеренную интегральным образом, более чем на порядок и достигает значения 80 MA/cm^2 . При этом мгновенное значение потока мощности составляет $6 \cdot 10^{13} \text{ Вт/см}^2$, что по своему значению приближается к потоку мощности, реализованной в настоящее время в экспериментах по лазерному термоядерному синтезу. В некоторых экспериментах, однако, была зарегистрирована сложная структура фокального пятна (рис. 2, з, д), свидетельствующая о том, что диодный ток разбивается на несколько отдельных нитей (это утверждалось ранее также в работе 1).

Описанная острая фокусировка в одну или несколько нитей наблюдалась только до значения времени 50 – 60 нсек от начала тока. В более позднее время мгновенные фотографии указывают на снижение плотности тока до величины, по порядку равных измеренным интегральным образом. Можно предположить, что расфокусировка пучка происходит из-за развития к этому моменту сильной неустойчивости тока диода. Из осциллограмм тока (рис. 3) видно, что существующие на токе ВЧ колебания резко возрастают на последней трети импульса. Характерный период этих колебаний составляет единицы наносекунд. Сравнение распределения интенсивности рентгеновского излучения в фокальном пятне, полученного с помощью ЭОПа, с измеренным интегрально по времени дает основание полагать, что хорошо сфокусированный пучок за время своего существования изменяет пространственное положение на аноде, последовательно "заштриховывая" площадь, которая идентифицируется интегральными по времени измерениями; при этом происходит быстрый нагрев малых участков фольги. После ухода пучка нагретый участок фольги остывает из-за расширения за время, сравнимое с временем нагрева. Поэтому температура, усредненная по поверхности интегрально-го фокального пятна, будет меньше, чем в случае нагрева в течение всего импульса. На это обратил наше внимание Л.И.Рудаков, за что мы ему и благодарны.

Литература

1. *Babykin M.V., Baygarin K.A., Bartov A.V. et al.* Proceedings of an advisory group meeting of the Technology of Inertial Confinement Experiments. Dubna, USSR, 19 – 23 July, 1976, IAEA – 200, Vienna, 1977.
2. Горбулин Ю.М., Злотников Д.М., Калинин Ю.Г., Скорюпин В.А. Сильноточный электронный ускоритель "Мираж". Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 1979, 2 (4), 84.
3. *Chickin R.V., Gorbulin Yu.M., Kalinin Yu.G., Markov Yu.A., Shashkov A.Yu., Skoryupin V.A., Zlotnikov D.M.* Interaction of the intense focused REB with dense plasma. Tenth European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Moscow, 1981.