

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА С ПОМОЩЬЮ ЯДЕРНОЙ ЭМУЛЬСИИ

А. А. Александров, В. А. Грибков, В. В. Кушин, В. К. Ляпидевский, О. Г. Семенов, Г. В. Склизков

УДК 537.531 + 537.533 + 533.951

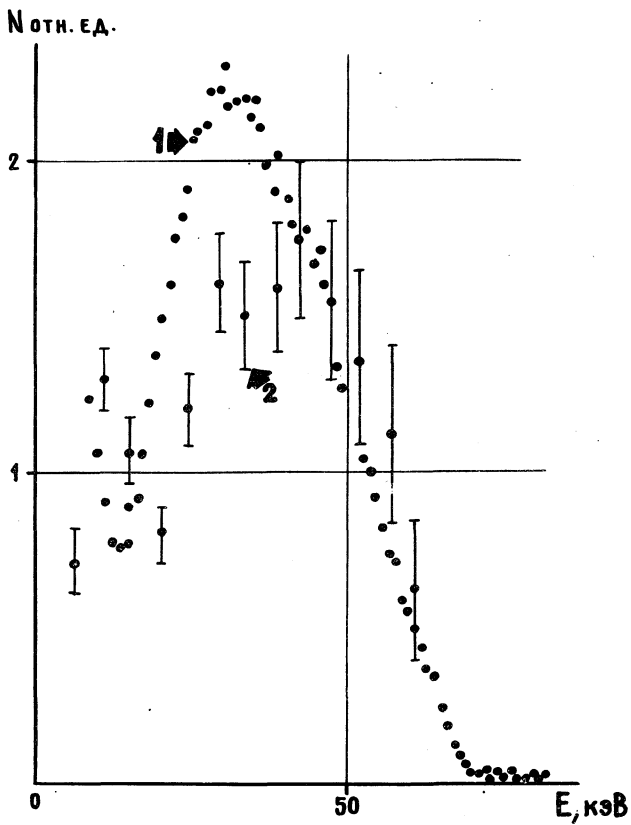
С помощью ядерных эмульсий исследовалось энергетическое распределение жесткого рентгеновского излучения плазменного фокуса. Вид спектра свидетельствует о существовании ускорительных процессов в разряде, приводящих к образованию монохроматического потока электронов с энергией $\approx 10^5$ эВ.

Изучение сильнотоочных разрядных устройств типа "Z-пинч" (плазменного фокуса (ПФ) /1,2/, вакуумной искры /3/ и др.), в том числе исследования жесткого рентгеновского излучения /4/ и интерферометрия плазменного фокуса /5/, привели к выводу о возникновении на определенной стадии разряда потоков электронов, ускоренных до энергии порядка 10^5 и более электронвольт при максимальном зарядном напряжении батареи питания ПФ 10+30 киловольт. Было показано /5,II/, что ПФ представляет собой, в сущности, индуктивный плазменный накопитель с плазменным размыкателем. При этом энергия магнитного поля идет в первую очередь не на нагрев плазмы, а на ускорение определенной части электронов. В работах /5,6/ было предложено использовать этот поток релятивистских электронов совместно с импульсом мощного лазерного излучения для повышения эффективности ввода энергии электронов в вещество и осуществления, таким образом, комбинированного нагрева плазмы. Детальное исследование механизмов ускорения потока электронов, возникающего в ПФ, проводилось различными методами, в частности, путем анализа формы спектра жесткого рентгеновского (ЖР) излучения, сопровождающего физические процессы, протекающие в этих установках. К настоящему времени сформировался ряд методов определения спектрального состава импульсного рентгеновско-

го излучения: определение спектров по кривой ослабления /7/, метод фильтров Росса /8,9/, метод флуоресцентных эмиттеров /10/, регистрация с помощью ядерных эмульсий /4,13/.

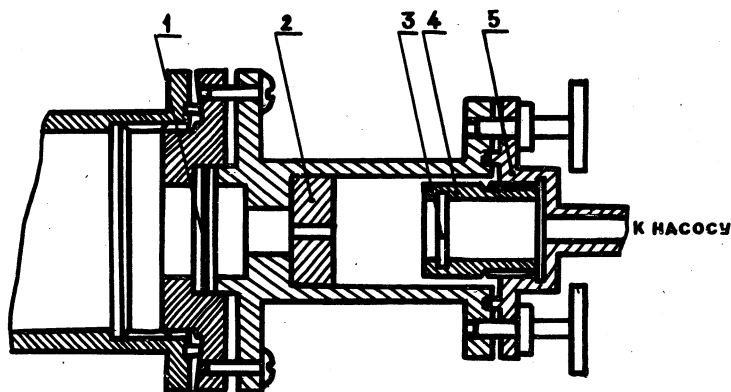
В настоящей работе определение энергетического спектра импульсного рентгеновского излучения производилось с помощью ядерной эмульсии путем измерения распределения числа электронных треков по количеству зерен /4/. Методика имеет ряд преимуществ: 1) рабочий энергетический диапазон не ограничен со стороны высоких энергий, как это имеет место в спектрометрах на фильтрах Росса или флуоресцентных эмиттерах; 2) оценка спектрального состава рентгеновского излучения может производиться после непосредственного облучения эмульсионного слоя, что в принципе позволяет устранить трудности калибровки фольг; 3) ядерная эмульсия нечувствительна к электромагнитной наводке, которая возникает при работе мощных плазменных электроразрядных установок и затрудняет использование детекторов; 4) эмульсионные слои можно использовать для получения изображения плотной плазмы в рентгеновском диапазоне энергий, а также в качестве дозиметров в сочетании с фильтрами Росса, флуоресцентными эмиттерами или фильтрами поглощения /12/. Однако трудоемкость, связанная с подсчетом большого числа треков, и отсутствие временного разрешения создают определенные неудобства при обработке и интерпретации экспериментальных данных.

Эксперименты проводились на установке "Плазменный фокус" с параметрами: энергия батареи 45 кДж, напряжение 25 кВ, рабочее давление 0,3 тор, диаметр внутреннего электрода 50 см, наружного - 70 см, максимальный ток 800 кА. Применялась ядерная эмульсия типа Р-2Т толщиной 50 мкм. Калибровка эмульсии проводилась с помощью монолиний характеристического излучения фольг различных элементов /5/. Правильность калибровки проверялась сравнением формы спектров, измеренных спектрометром полного поглощения с высоким энергетическим разрешением и спектрометром на основе ядерной эмульсии. При сравнении учитывалась зависимость эффективности регистрации рентгеновских квантов ядерной эмульсией от энергии. На рис. 1 представлен спектр тормозного излучения рентгеновской трубки, измеренный полупроводниковым детектором (ПД) типа ДПР-5 с энергетическим разрешением 3 кэВ по линии 122 кэВ и эмульсионным спектрометром. Наблюдается удовлетворительное совпадение результатов, полученных разными методами.



Р и с. 1. Спектр тормозного излучения рентгеновской трубки, измеренный ПЩ (1) и эмульсионным спектрометром (2)

На рис. 2 представлена конструкция камеры, на которой производилось экспонирование образцов ядерной эмульсии. Рентгеновское излучение проходило через бериллиевую фольгу 1 толщиной 200 мкм, свинцовый коллиматор 2 и падало на эмульсионный слой 3. Образец



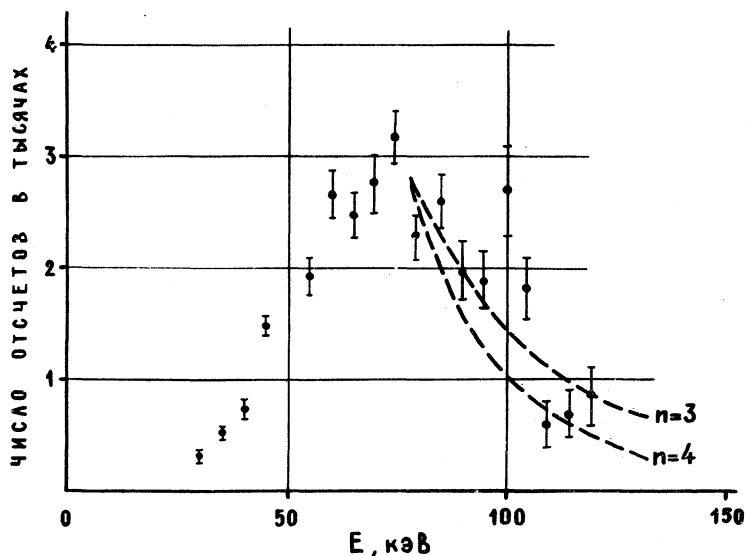
Р и с. 2. Эмульсионная камера. Пояснения см. в тексте

эмульсии закреплялся в кассете 4 так, что пучок падал перпендикулярно к его поверхности. Конструкция крышки камеры 5 позволяла легко заменять кассеты с эмульсионными слоями. Перед экспонированием камера откачивалась до давления 10^{-2} тор.

Облученные образцы ядерной эмульсии проявлялись обычным способом и затем просматривались с помощью микроскопа МБИ-3. На рис. 3 представлен спектр рентгеновского излучения плазменного фокуса. Спад спектра в мягкой области обусловлен тем, что между источником излучения и камерой находилась алюминиевая пластина толщиной 5 мм, которая поглощала кванты с энергией меньше 70 кэВ. Экспериментальные точки на спадающей части аппроксимировались степенными зависимостями $N = const \cdot E^{-n}$ с разными показателями степени. Из полученных данных можно сделать следующие выводы:

1) ИФ действительно является источником потоков релятивистских электронов с энергией, превышающей энергию, возможную при классическом ускорении под действием зарядного напряжения батарей;

- 2) эти потоки весьма далеки от моноэнергетических и имеют медленно спадающий в сторону больших энергий "хвост";
- 3) форма спектра весьма похожа на получающуюся при исследовании рентгеновских вспышек на Солнце [14], что может указывать



Р и с. 3. Аппаратурный спектр рентгеновского излучения плазменного фокуса. Кривые - графики функции aE^{-n}

на возможные аналогии в ускорительных механизмах в этих классах явлений.

Такой спектр $X\gamma$ излучения невозможно объяснить моноэнергетическим электронным потоком, что может быть связано либо с иным механизмом ускорения электронов по сравнению с ускорительным диодом, либо свидетельствовать, в принципе, о коллективном взаимодействии первоначально квазимонохроматического пучка с плазмой. Для выяснения истинной причины получаемого спектрального распределения необходимо привлечение других методик, в частности, исследований спектра $X\gamma$ с временным разрешением.

В заключение авторы выражают благодарность О. Н. Крокину, А. И. Исакову за поддержку работы и обсуждения, а также А. В. Дубровскому за помощь в проведении экспериментов.

Поступила в редакцию
24 мая 1977 г.

Л и т е р а т у р а

1. Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова, В. П. Виноградов, *Nuclear Fusion, Suppl. part 2*, 577 (1962).
2. J. W. Mather, *Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res.*, 1965, IAEA, vol. 2, C-21/80, Culham, UK.
3. L. Cohen, U. Feldman, M. Swartz, J. H. Underwood, *Jorn. Opt. Soc. of America*, 58, 843 (1968).
4. H. L. L. van Raassen, R. E. Vandre, R. S. White, *Phys. Fluids*, 13, 2606 (1970).
5. В. А. Грибков, О. Н. Крокин, Г. В. Склизков, Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова, *Труды ФИАН*, 85, 193 (1976).
6. В. А. Грибков, О. Н. Крокин, Г. В. Склизков, Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова, *Письма в ЖЭТФ*, 18, 9 (1973).
7. E. Little, W. Quinn, F. Ribe, G. Sawyer, *Nuclear Fusion, Supplements, Conf. Proceed., part 2*, 492 (1962).
8. P. A. Ross, *Jorn. Opt. Soc. of America and Rev. Sci. Instr.* 16, 433 (1928).
9. Д. Джонсон. Приборы для научных исследований, 45, 2, 191 (1974).
10. Г. М. Горбаченко, С. А. Зверев, В. К. Ляпидевский, *ИТЭ*, № I, 200 (1976).
11. V. A. Gribkov, *Proceeding of the international conference on energy storage, compression and switching, 1974, Torino, Italy*.
12. M. J. Bernstein, D. A. Meskan, H. L. L. van Raassen, *Phys. Fluids*, 12, 10, 2193 (1969).
13. J. H. Lee, O. S. Loebbaka, C. E. Roos, *Plasma Phys.*, 13, 347 (1971).
14. Б. В. Сомов, С. И. Сыроватский, УФН, 120, 217 (1976).
15. А. А. Александров, К. С. Богомолов и др. Тезисы докладов на 27 Всесоюзном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ленинград, 1977 г.