

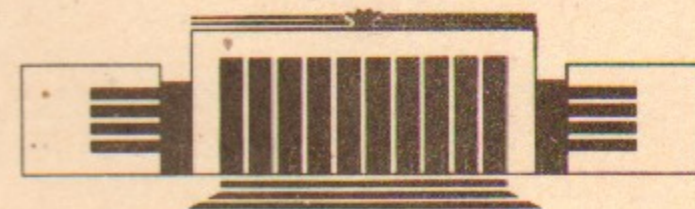


43
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

С.Г. Воропаев, Ю.И. Деулин, А.В. Карюкин,
С.В. Лебедев, М.А. Щеглов

АНАЛИЗАТОР ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА
ЗАМАГНИЧЕННОГО РЭП.

ПРЕПРИНТ 91-106



НОВОСИБИРСК

Анализатор энергетического спектра
замагниченного РЭП

*С.Г. Воропаев, Ю.И. Деулин, А.В. Карюкин,
С.В. Лебедев, М.А. Щеглов*

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

© Институт ядерной физики СО АН СССР

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сильноточные замгниченные РЭП находят широкое применение в экспериментах по нагреву плазмы в открытых ловушках, генерации мощных импульсов СВЧ-излучения и других приложениях. Одной из важных характеристик таких пучков является их энергетический спектр, т.е. мгновенное распределение электронов пучка по энергиям. Знание энергетического спектра пучка, прошедшего через область взаимодействия, позволяет, в частности, определять эффективность взаимодействия, а также дает информацию о процессах, протекающих в исследуемой системе.

Для транспортировки сильноточных РЭП необходимо использовать достаточно сильное ведущее магнитное поле. Анализ потока электронов и нахождение энергетического спектра РЭП в этом случае существенно затруднены. Для решения данной задачи были разработаны и применяются различные методики. В ряде работ описаны устройства, основанные на закономерностях прохождения электронов через тонкие фольги. В этих работах используется набор изолированных друг от друга фольг и измеряются токи (либо накопленные заряды) на каждую из фольг. Зная распределение токов по фольгам можно путем решения обратной задачи восстановить энергетический спектр пучка. Этот метод определения спектра показал свою работоспособность в целом ряде экспериментов [1—4]. Некоторым его неудобством является достаточно трудоемкая ро-

цедура восстановления спектра, что затрудняет оперативное получение информации о спектре пучка. В частности, для того чтобы проследить временную эволюцию спектра, необходимо для каждого момента времени проводить решение обратной задачи.

В ряде работ (см., например, [3, 5, 6]) были использованы магнитные спектрометры. В этом случае часть пучка выводилась в область, экранированную от ведущего магнитного поля, и проводился анализ пучка по энергиям в относительно слабом поперечном магнитном поле анализатора с полукруговой фокусировкой.

В настоящей работе описан магнитный анализатор, в котором экранировка ведущего магнитного поля не производится. Анализатор основан на использовании резкого изменения направления силовых линий магнитного поля, неадиабатического для электронов пучка. Описываемый анализатор был разработан для установки ГОЛ-3 [7], на которой ведутся эксперименты по нагреву плотной плазмы с помощью сильноточного РЭП микросекундной длительности.

Схема установки ГОЛ-3 показана на рис. 1. Пучок генерируется в

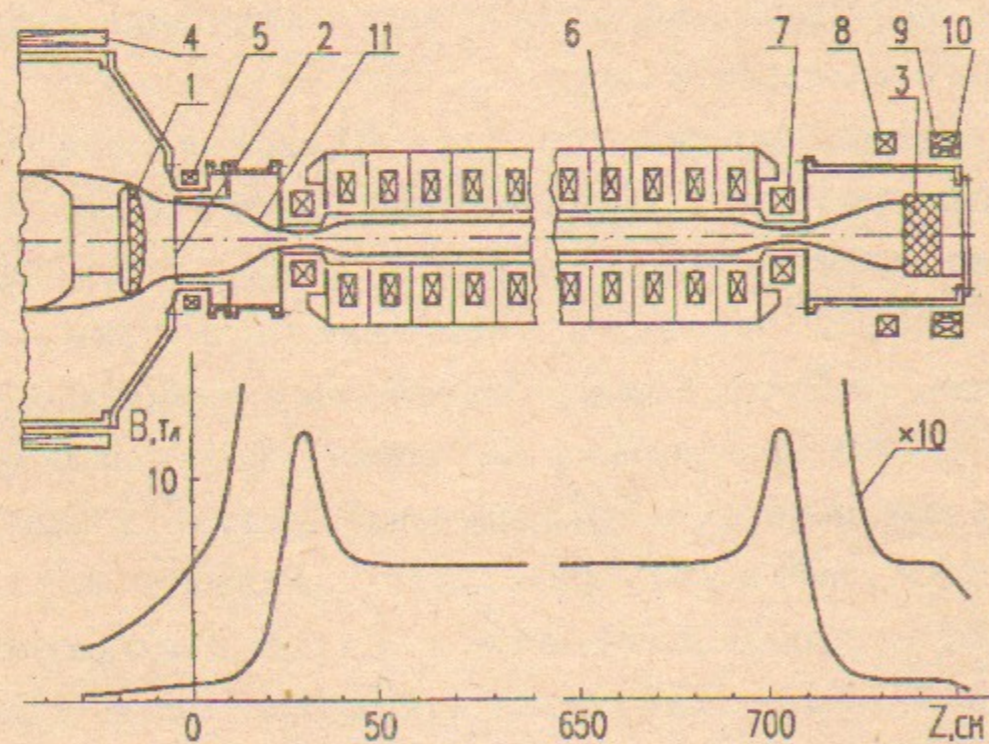


Рис. 1. Схема установки ГОЛ-3. 1—катод ускорителя, 2—анодная фольга, 3—выходной коллектор, 4—10 — катушки магнитного поля, 11—ход силовых линий. Внизу—распределение магнитного поля.

диоде ускорителя при сравнительно небольшой величине магнитного поля (0.6 Тл). Затем плотность тока пучка увеличивается в 10 раз за счет его адиабатической компрессии в магнитном поле пробочной конфигурации, после чего пучок инжектируется в камеру с сильным магнитным полем, где и происходит его взаимодействие с плазмой. Поле в однородной части длиной 7 м составляет 6 Тл, а в пробках до 12 Тл. На выходе из соленоида пучок расширяется до исходного размера 20 см и принимается коллектором анализатора. Коллектор расположен в поле 0.6 Тл. Типичные параметры пучка в этих экспериментах следующие: энергия электронов до 1 МэВ, ток пучка до 50 кА, плотность тока пучка в плазме 1—2 кА/см², длительность импульса до 5 мкс.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ АНАЛИЗАТОРА

Для определения энергетического спектра пучка создается дополнительное магнитное поле с резкой границей, поперечное к ведущему магнитному полю (Рис. 2). Для анализа используется часть пучка, входящая через малое отверстие. Если область, в которой происходит изменение направления магнитного поля мала по сравнению с ларморовским

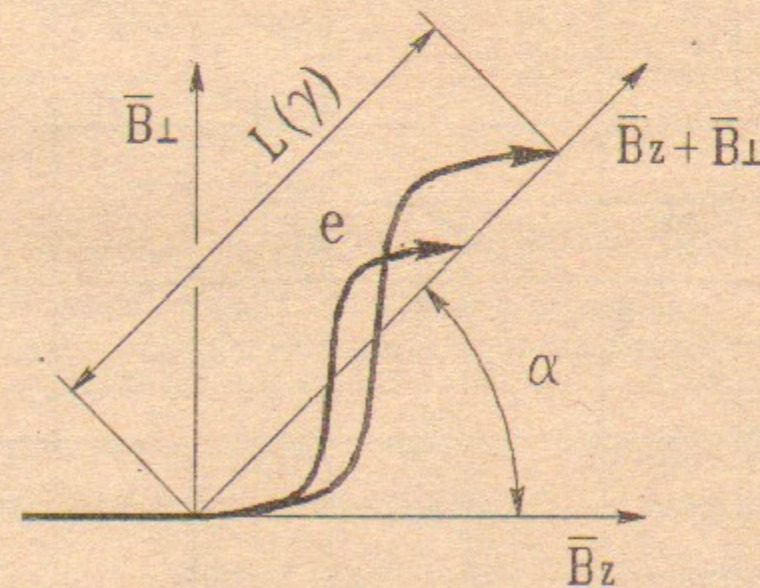


Рис. 2. Геометрия магнитного поля анализатора. B_z —ведущее магнитное поле, B_{\perp} —поперечное магнитное поле с резкой границей. α —угол между направлениями ведущего и результирующего магнитных полей.

радиусом электронов пучка, то все электроны входят в анализатор с одинаковым и известным питч-углом по отношению к суммарному магнитному полю. В результирующем магнитном поле происходит разделение электронов разных энергий по величине шага ларморовской спирали. Таким образом на каждый коллектор попадают электроны известной энергии. Регистрируя соответствующие токи на коллекторы можно определить мгновенный энергетический спектр пучка.

Если величина ведущего магнитного поля B_0 , а угол излома силовой линии есть $\alpha = \text{arctg}(B_1 / B_0)$, то радиус ларморовской спирали есть:

$$R(\gamma) = R_0 \cdot \text{Cos}(\alpha) \cdot \text{Sin}(\alpha) \cdot (\gamma^2 - 1)^{1/2},$$

а величина шага ларморовской спирали

$$l(\gamma) = R_0 \cdot 2\pi \cdot \text{Cos}^2(\alpha) (\gamma^2 - 1)^{1/2}.$$

Здесь $R_0 = mc^2 / eB_0$, γ — релятивистский фактор.

Зависимость шага траектории l от энергии электронов для случая $B_0 = 2$ кГс и $\alpha = 45^\circ$, который был реализован в описанной ниже конструкции, показана на рис. 3.

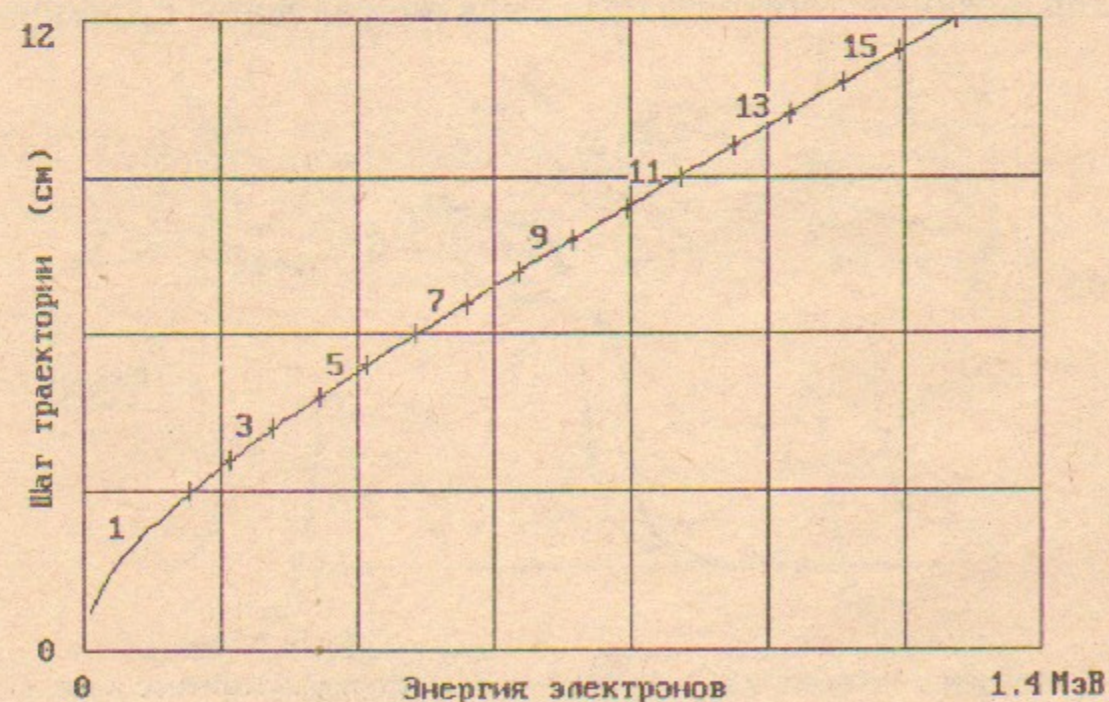


Рис. 3. Зависимость шага ларморовской спирали от энергии электронов для $B_z = 2$ кГс и $\alpha = 45^\circ$. Отмечено положение коллекторов анализатора.

3. КОНСТРУКЦИЯ АНАЛИЗАТОРА

Конструкция анализатора показана на рис. 4. Пучок принимается графитовым коллектором 1, в котором имеются два отверстия для вывода части пучка в область более слабого поля. Ток пучка на коллектор измеряется поясом Роговского 3. Дополнительное поперечное магнитное поле анализатора создается длинным соленоидом, имеющим сечение 10×10 см и длину 40 см. Намотка имеет 50 витков и выполнена шиной 4×1.5 мм². Питание соленоида осуществляется импульсом тока с полупериодом 2 мс. Для ввода пучка в анализирующее поле в двух сечениях

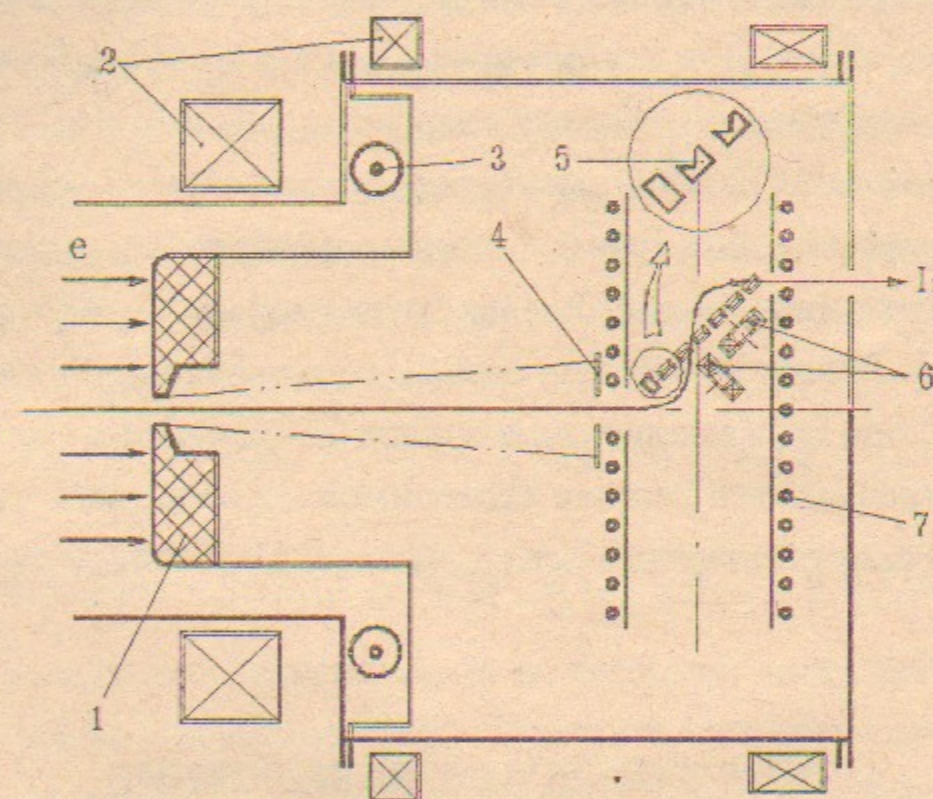


Рис. 4. Конструкция анализатора. 1—графитовый коллектор, 2—катушки магнитного поля, 3—пояс Роговского, 4—входная диафрагма, 5—коллекторы, 6—магнитные зонды, 7—соленоид анализатора.

соленоида имеются зазоры между витками шириной 0.8 см, в которые устанавливаются диафрагмы, определяющие размер вводимого пучка. Диаметры отверстий в диафрагмах и их толщины выбирались так, чтобы не происходило искажения исходного углового спектра (и, соответственно, искажений энергетического спектра) в используемой для измерений части пучка.

Для подбора необходимой величины тока в соленоиде производятся измерения результирующего поля двумя магнитными зондами. Один из них ориентирован так, что при правильном подборе тока дает нулевой сигнал, а второй измеряет суммарное магнитное поле в анализаторе. Знание этого поля позволяет проводить абсолютные измерения спектра пучка.

Коллекторы анализатора изготовлены из графита и их форма показана на фрагменте рис. 4. Такая форма коллекторов выбрана для уменьшения возможного влияния на измерения отраженных от коллекторов электронов. В ряде экспериментов применялись также и плоские коллекторы. Коллекторы расположены с шагом 6 мм, а ширина каждого коллектора составляет 5 мм. Для исключения влияния на правильность измерений потока электронов с низкими энергиями, для которых излом силовой линии не является резким, высота первого коллектора выбрана такой, что он собирает все электроны с малым поперечным ларморовским радиусом. Соответствие номера коллектора измеряемой им энергии показано на рис. 3. Величина измерительных сопротивлений была выбрана равной 15 Ом, при этом амплитуда сигналов на коллекторах не превышала 50 В при имевшейся в данных экспериментах плотности тока пучка. Регистрация токов осуществлялась с помощью АЦП Ф4226 с временным шагом 50 нс.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Основными факторами, определяющими энергетическое разрешение анализатора, являются угловой разброс электронов на входе в анализатор и размер (ширина) приемных коллекторов (при этом имеется в виду, что проекция размера диафрагмы, через которую пучок вводится в анализирующее поле, соответствует либо меньше ширины коллекторов).

В описываемых в данной работе экспериментах коллекторы были расположены с шагом 6 мм и соответствующий вклад в энергетическое

разрешение составляет ~7% для энергии 1.2 МэВ и ~20% для 0.3 МэВ. (В принципе расстояние между коллекторами и их размер могут быть уменьшены, однако в нашем случае не очень значительно из-за наличия микроструктуры пучка [8], проявляющейся в сильной "изрезанности" осциллограмм тока за малым отверстием. Данное обстоятельство может сильно затруднить обработку полученных сигналов).

Угловой разброс пучка определяется прежде всего наличием взаимодействия пучка с плазмой, и на выходе из области взаимодействия может достигать величины порядка 1 [9]. Для уменьшения влияния углового разброса на энергетическое разрешение анализатор расположен в области, где магнитное поле составляет 1/60 от величины поля в выходной пробке соленоида. Это приводит к тому, что из-за сохранения магнитного момента максимально возможный питч-угол на входе в анализатор не превышает $\beta = \arcsin (B_0/B_m)^{1/2} = 7^\circ$. Такой угол реализуется для электронов, имеющих питч-угол 90° в магнитной пробке.

Для электрона имеющего на входе в анализирующее поле питч-угол $\alpha + \beta$ величина шага спирали есть:

$$l(\gamma) = 2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot (\gamma^2 - 1)^{1/2} \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\alpha + \beta).$$

Следовательно, $\frac{\Delta l}{l} = \beta \cdot \sin(\alpha) / \cos(\alpha)$ и для $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 7^\circ$ $\Delta l/l = 12\%$.

Соответствующая максимально возможная погрешность определения энергии не превышает 12%. Отметим, что погрешность в измерении энергии возникает только от углового разброса в плоскости излома силовых линий, а угловой разброс в поперечном направлении практически не влияет на величину шага ларморовской спирали.

5. ПРИМЕР РАБОТЫ АНАЛИЗАТОРА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3

5.1 Калибровка анализатора

Энергия электронов, приходящих на каждый канал анализатора легко вычисляется, если известны величина магнитного поля в анализаторе

и расположение измерительных коллекторов. Следовательно анализатор позволяет проводить абсолютные измерения энергии электронов пучка и калибровка анализатора вообще говоря не требуется. Однако для повышения точности относительных измерений и проведения измерений эффективности взаимодействия пучка, желательно провести калибровку анализатора относительно диодного напряжения ускорителя, измеряемого резистивным делителем. Для этого необходимо провести измерения пучка, не проходящего через область взаимодействия. Это можно сделать, например, установив анализатор непосредственно за анодной фольгой ускорителя. Такие измерения, кроме установления соответствия диодного напряжения ускорителя показаниям анализатора, позволяют определить ширину аппаратной функции и "контрастность" анализатора.

К сожалению, в наших экспериментах отсутствовала возможность проведения измерений на выходе из ускорителя и калибровка была проведена следующим образом. На место анодной фольги ускорителя устанавливалась маска, вырезавшая центральную часть пучка диаметром 2 см. Этот пучок с током до 300 А сжимался в магнитном поле, проходил через всю установку и попадал в анализатор. Размеры пучка в области транспортировки ($\varnothing 0.5$ см) таковы, что его ток был существенно меньше предельного вакуумного. Давление в области транспортировки поддерживалось на уровне 10^{-4} Тор.

Результаты калибровки представлены на рис. 5. Вверху показаны осциллограммы напряжения на диоде и суммарного тока пучка на все коллекторы анализатора. Внизу приведен типичный энергетический спектр пучка. Ширина спектра в течение всего импульса не превышает 2-3 соседних каналов анализатора, что соответствует $\Delta E < 120$ кэВ и $\Delta E/E < 15\%$. Таким образом, определенная экспериментально ширина аппаратной функции анализатора соответствует приведенным выше оценкам. Величина сигналов в каналах отстоящих более чем на 2 от канала с максимальным сигналом составляет менее 10%. Расчетная

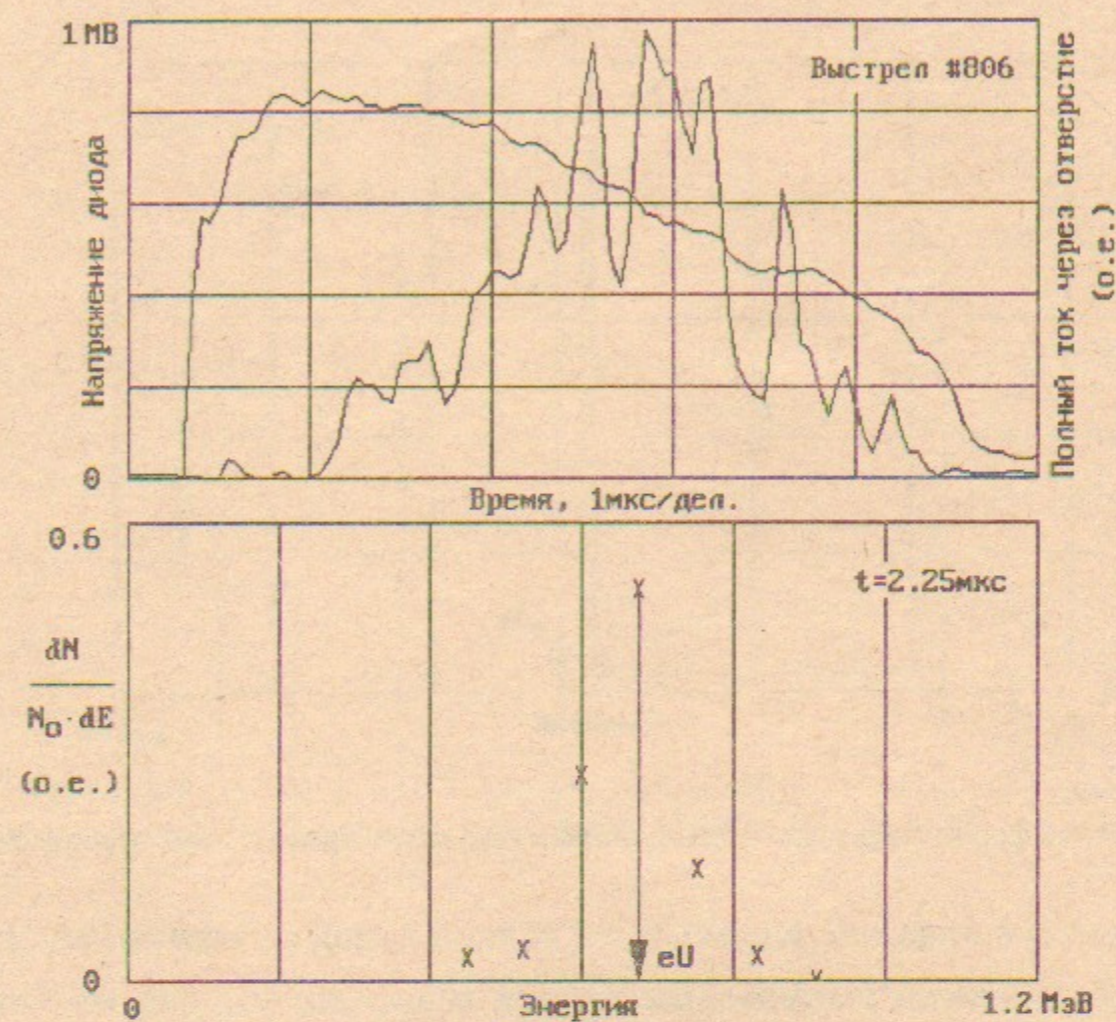


Рис. 5. Калибровка анализатора. Вверху показано напряжение на диоде и суммарный ток на коллекторы. Внизу—энергетический спектр калибровочного пучка. Стрелкой отмечена величина диодного напряжения ускорителя.

энергия канала, на котором наблюдается максимальный сигнал, отличается от величины eU на 10% в течение всего импульса. Различие между eU и расчетной энергией каналов объясняется точностью измерения суммарного магнитного поля (15%) и точностью абсолютной калибровки делителя диодного напряжения ускорителя (5%). Далее при обработке экспериментальных данных величина магнитного поля выбиралась такой, чтобы расчетная энергия каналов совпадала с величиной eU .

5.2. Энергетический спектр пучка

Анализатор был опробован в серии экспериментов по нагреву лазмы на установке ГОЛ-3. Эксперименты велись в следующих условиях. В соленоиде создавалась область водородной плазмы плотностью длиной $10^{14} - 10^{15}$ см $^{-3}$ 5—7 м, в которой происходит эффективное взаимо-

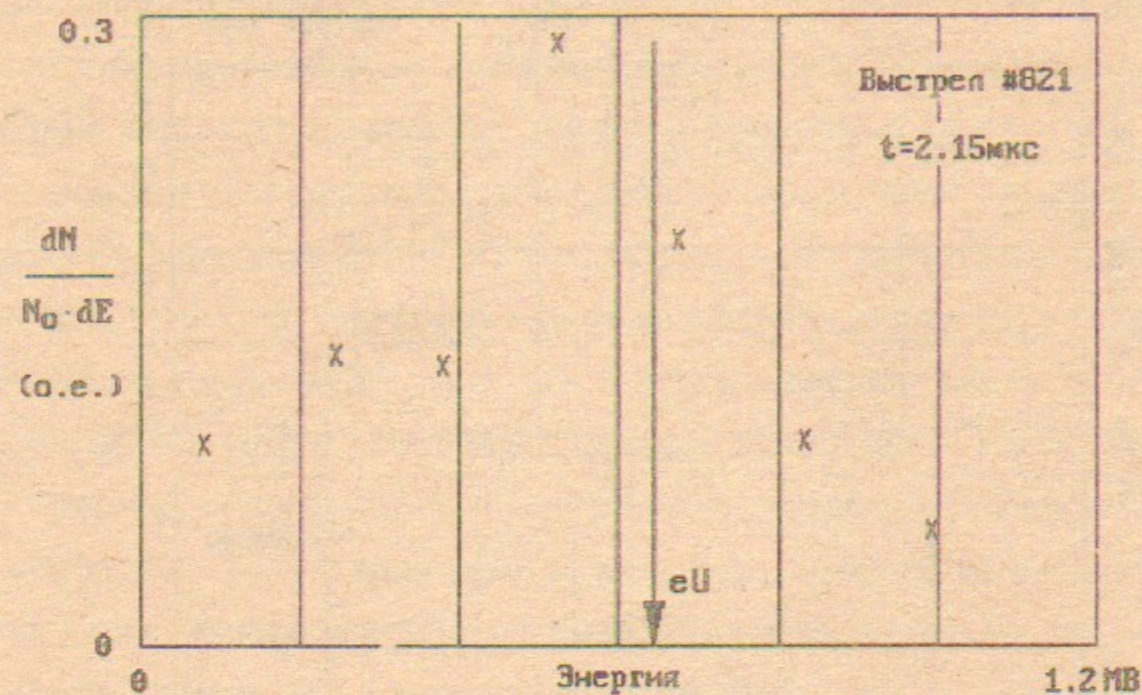


Рис. 6. Типичная форма энергетического спектра пучка после прохождения через плазму.

действие пучка с плазмой. Кроме этого вблизи одной из магнитных пробок мог производиться импульсный напуск водорода, так что на длине ~ 2 м создавалось облако с $nL \sim 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$.

Измерения анализатором проводились в центре пучка. Типичная форма спектра пучка в данных условиях показана на рис. 6. Видно, что произошло существенное уширение энергетического спектра с появлением замедленных электронов с энергией до < 200 кэВ (при энергии электронов на входе eU порядка 700 кэВ), а также ускоренных с энергией, превышающей приложенное к диоду напряжение. Доля ускоренных электронов достигает 15%, а превышение их энергии над исходной — 200—300 кэВ.

Отметим, что из-за проявления микроструктуры пучка суммарный ток входящий в анализатор имеет достаточно изрезанную форму. Тем не менее наблюдается только медленное изменение формы спектра в течение импульса, связанное, по-видимому, с особенностями процесса взаимодействия пучка с плазмой. Используя полученные спектры пучка можно определить, как меняется эффективность взаимодействия пучка

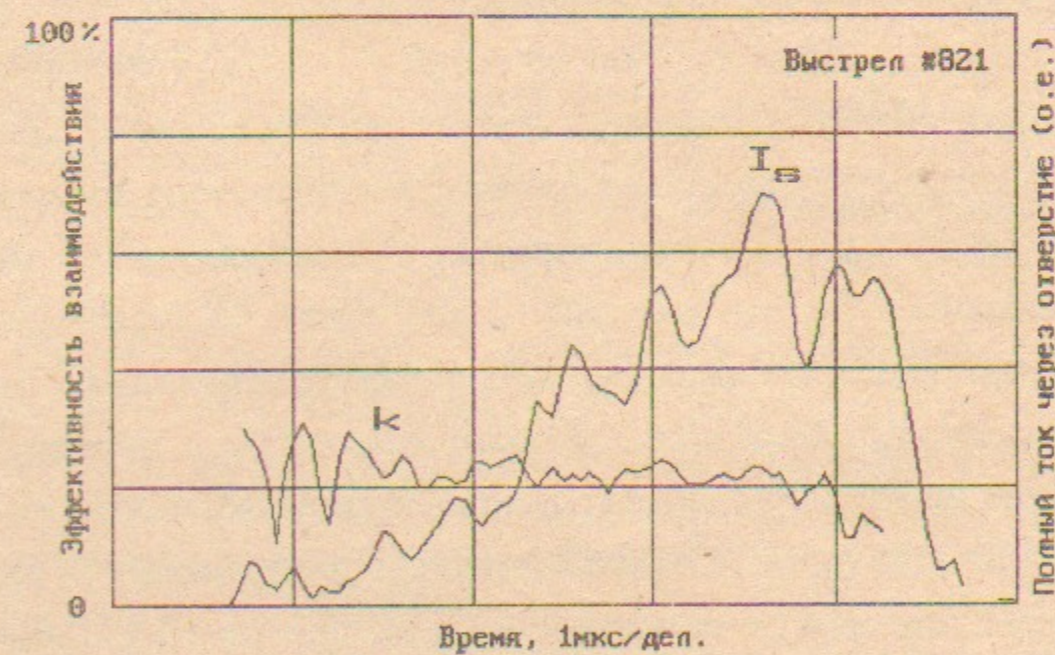
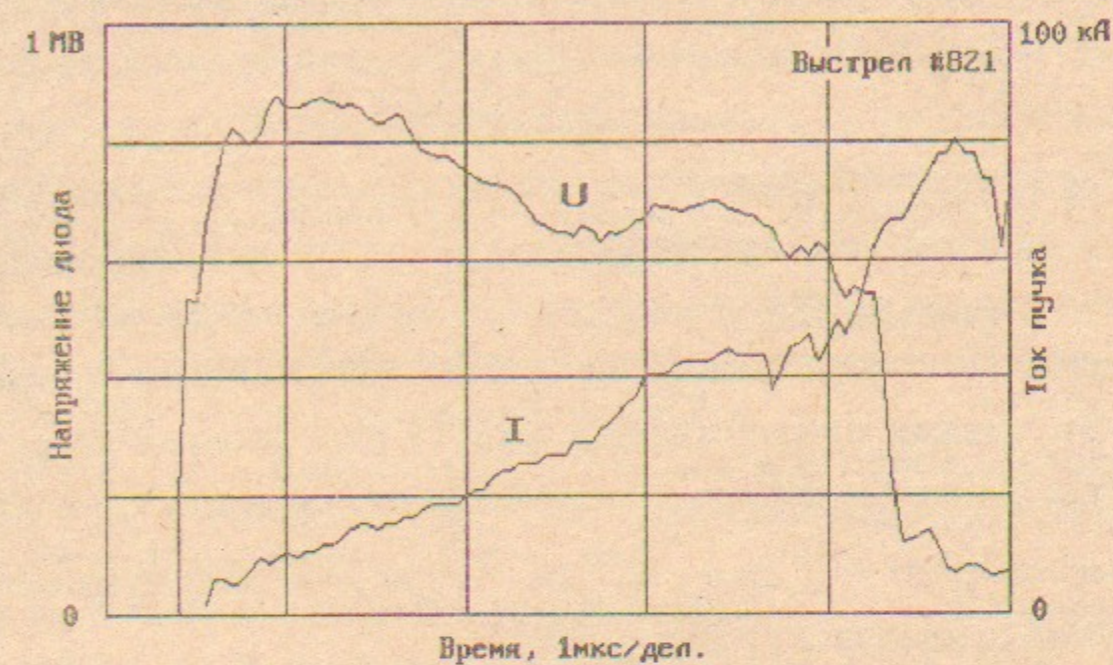


Рис. 7. Зависимость эффективности взаимодействия пучка с плазмой от времени определенная с помощью анализатора энергетического спектра пучка.

во времени. Для этого в каждый момент времени по энергетическому спектру определим среднее значение энергии электронов пучка E и сравним с величиной eU . Эффективность взаимодействия определим как $k = (eU - E) / eU$. Полученная таким образом зависимость эффективности взаимодействия от времени показана на рис. 7. Видно, что в данном случае эффективность слабо зависит от времени и составляет около 20%.

В предыдущих экспериментах на установке ГОЛ-3 [10] по калориметрическим измерениям потерь энергии пучка наблюдалось, что эффективность взаимодействия растет с уменьшением плотности плазмы. Этот вывод подтверждается также и измерениями энергетического спектра пучка. Плотность основной плазмы в данной серии экспериментов менялась от 10^{14} до $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При этом эффективность взаимодействия изменялась от 30% до <5%.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан анализатор мгновенного энергетического спектра замагниченного РЭП. Принцип действия анализатора основан на использовании резкого изменения направления силовых линий магнитного поля, неадиабатического для электронов пучка. Описана конструкция анализатора, рассмотрены основные факторы, влияющие на энергетическое разрешение. Работоспособность анализатора проверена в экспериментах по нагреву плазмы с помощью сильноточного микросекундного РЭП на установке ГОЛ-3. Определено энергетическое разрешение анализатора, которое не превышает 10% при энергии 0.8 МэВ и 20% при 0.3 МэВ.

В одном из режимов взаимодействия пучка с плазмой получены энергетические спектры пучка. Эффективность взаимодействия пучка с плазмой, определенная с помощью анализатора, достигает 30%, что согласуется с результатами калориметрических измерений потерь энергии пучка в плазме.

Авторы благодарны В.С. Койдану и Д.Д. Рютову за поддержку работы и полезные обсуждения; А.В. Бурдакову, К.И. Меклеру, В.С. Николаеву и В.В. Поступаеву за помощь и совместное участие в экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дергобузов К.А., Евдокимов О.Б., Кононов Б.А., Ягушкин Н.И. Спектрометр интенсивных пучков электронов. ПТЭ, 1975, N 1, с.29—30.
2. Аржанников А.В., Астрелин В.Т., Драгунов В.П. Определение спектра энергий релятивистских электронов по их поглощению в металле. Препринт ИЯФ 77—102, Новосибирск, 1977; Аржанников А.В., Астрелин В.Т. Анализ мгновенного спектра энергий релятивистских электронов по их поглощению в алюминии. ПМТФ, 1979, N 6, с.3.
3. Крастелев Е.Г., Месхи Г.О., Яблоков Б.Н. Измерения энергетического спектра сильноточных электронных пучков. ПТЭ, 1976, N.3, с.39 — 41.
4. Бугаев С.П., Дергобузов К.А., Кармадонов А.Н., Кононов Б.А., Кошелев В.И., Ягушкин Н.И. Спектрометр сильноточных трубчатых пучков электронов. ПТЭ, 1979, N.6, с.44—46.
5. Герасимов А.И., Дубинов Е.Г., Кудасов Б.Г. Спектрометр импульсного пучка электронов. ПТЭ, 1971, N.3, с.31—34.
6. Бугаев С.П., Кошелев В.И., Тимофеев М.Н. Исследование энергетического спектра электронов в сильноточном вакуумном диоде. ЖТФ, 1974, т.44, N 9, с.1917—1921.
7. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Kapitonov V.A. et al. Plasma Physics and Controlled Fusion, 1988, v.30, N 11, p.1571.
8. Воропаев С.Г., Койдан В.С., Лебедев С.В., Николаев В.С., Чикуннов В.В., Щеглов М.А. Мощный релятивистский электронный пучок микросекундной длительности для нагрева плазмы. ДАН СССР, 1984, т.276, N.1, с.111—115.
9. Arzhannikov A.V. et al. Proc. of the International Conference on Plasma Physics, Lausanne, 1984, v.1, p.285.
10. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Chikunov V.V. et al. Proc. 8-th. Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. Novosibirsk, 1990, v.1, p.14—25.

С.Г. Воропаев, Ю.И. Деулин, А.В. Карюкин,
С.В. Лебедев, М.А. Щеглов

Анализатор энергетического спектра замагниченного РЭП

Ответственный за выпуск: С.Г. Попов

Работа поступила 3 октября 1991 г.

Подписано в печать 15. 10 1991 г.

Формат бумаги 60×90 1/16. Объем 0,8 печ.л., 0,7 уч.-изд.л.

Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 106.

Обработано на IBM PC и отпечатано на

ротапринте ИЯФ СО АН СССР,

г. Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.