

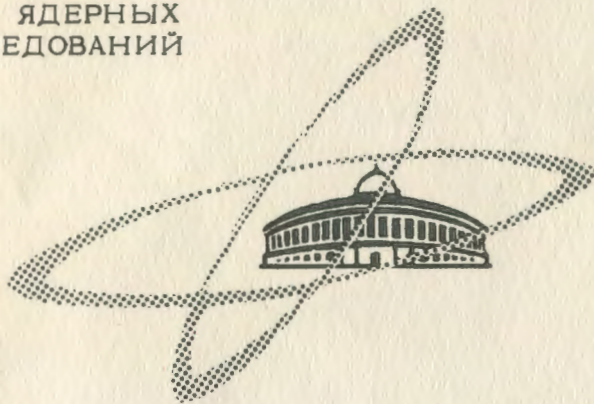
С 345с 2

К-142

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2795



Г.С. Казанский, А.И. Михайлов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВТОРНОГО ЗАХВАТА
И УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ В РЕЖИМЕ "СТОЛА"
МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1966

2795

Г.С. Казанский, А.И. Михайлов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВТОРНОГО ЗАХВАТА
И УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ В РЕЖИМЕ "СТОЛА"
МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

4384/1. 40.

В в е д е н и е

При осуществлении медленного вывода ускоренных протонов на мишень применяется ряд способов, которые достаточно полно описаны в литературе ^{/1/,/2/}. Наиболее перспективным с точки зрения структуры выводимых пучков вторичных частиц, а также малого разброса по импульсу в течение длительного времени взаимодействия первичного пучка частиц с мишенью является вывод ускоренных частиц в режиме слабо меняющегося во времени магнитного поля при отсутствии ускоряющего напряжения.

В этом случае в пучке вторичных частиц отсутствует высокочастотная структура^{х)}. Управление пучком частиц в этом режиме может быть осуществлено только при помощи параметров магнитного поля ^{/3/}, что представляет определенные технические трудности.

Задача настоящей работы состоит в том, чтобы изыскать наиболее простой способ управления пучком в режиме "стола" магнитного поля с целью совмещения двух физических экспериментов в одном цикле.

1. Управление частотой ускоряющего напряжения в режиме постоянного магнитного поля

Бесструктурный вывод частиц на "столе" магнитного поля связан с выключением высокой частоты в момент перехода системы питания магнита в "статический" режим. В этом режиме первичный пучок полностью взаимодействует с мишенью за время τ , определяемое параметрами магнитного поля и скоростью его изменения.

Выбирая начальное положение пучка вблизи мишени и задавая соответствующее значение \dot{H} , можно получить взаимодействие пучка с мишенью практически в те-

х) При наличии высокочастотного ускоряющего поля в пучке вторичных частиц имеется высокочастотная структура, обусловленная периодическим (с частотой обращения) взаимодействием с мишенью конечного по азимуту сгустка ускоряемых частиц.

чение всего "стола" поля. Количественные оценки удобно проводить по формуле:

$$r = \frac{H(1-p)}{H} \cdot \frac{d}{R_0} \quad (1)$$

где H - значение магнитного поля в момент вывода;
 \dot{H} - скорость изменения магнитного поля;
 p - показатель спада магнитного поля;
 d - ширина пучка с учетом свободных колебаний;
 R_0 - центральный радиус.

С точки зрения эффективности использования ускорителя целесообразно осуществлять комбинированные режимы, в которых наряду с экспериментами со счетчиками, требующими максимальной интенсивности, проводятся эксперименты на камерах.

Для осуществления такого режима необходимо, чтобы на время взаимодействия пучка с первой мишенью при слабо изменяющемся магнитном поле исчезала область фазовой устойчивости для ускоряемых частиц, а затем вновь возникала, обеспечивая повторный захват и ускорение оставшихся частиц для последующего вывода на другую мишень. Принципиально эту задачу можно решить тремя способами: а) манипуляцией амплитуды ускоряющего напряжения; б) сдвигом фазы в/ч ускоряющего поля на ускоряющих электродах; в) выключением в/ч ускоряющего поля. Кратко рассмотрим эти способы.

а) Манипуляция амплитуды в/ч ускоряющего напряжения.

На первый взгляд этот способ кажется наиболее простым и доступным, так как в аппаратуре имеется устройство для программирования амплитуды в/ч ускоряющего напряжения. Уменьшение амплитуды в/ч ускоряющего поля до некоторой определенной величины в зависимости от скорости изменения напряженности магнитного поля приводит к исчезновению области фазовой устойчивости, вследствие чего частицы не приобретают необходимого прироста энергии за оборот и выбывают из ускорения. Прирост энергии за оборот для равновесной частицы определяется согласно выражению ^{1/4/}:

$$e V_0 \cos \phi_0 = \frac{(2\pi R_0 + L) \cdot e \cdot R_0 \cdot H}{c} \quad (2)$$

где $e V_0$ - амплитуда ускоряющего поля;
 ϕ_0 - равновесная фаза;
 L - суммарная длина прямолинейных промежутков;
 R_0 - радиус равновесной орбиты;
 e - заряд протона;
 c - скорость света.

Максимально возможную амплитуду ускоряющего поля для обеспечения вывода пучка в течение всей длительности "стола" магнитного поля можно определить, используя формулы (1) и (2). Расчеты показывают, что, например, для энергии 10 Гэв ($H = 13$ кэ) и длительности "стола" 0,4 сек максимальный прирост энергии за оборот должен быть не более 30 эв ($V_0 = 130$ в). Однако следует отметить, что в действительности на "столе" магнитного поля имеются значительные пульсации. Амплитуда первой гармоники пульсаций \dot{H} соответственно равна: на растущем поле в конце цикла 250 э/сек; на "столе" магнитного поля 800 э/сек; на спадающем поле 600 э/сек.

В режиме нормального ускорения при $e V_0 = 9,8$ кэв ($V_0 = 40$ кв) равновесная фаза ϕ_0 колеблется вследствие пульсаций \dot{H} соответственно: на растущем поле в конце цикла $(77 \pm 1)^\circ$, на "столе" магнитного поля $(90 \pm 2,75)^\circ$; на спадающем поле $(103 \pm 2)^\circ$.

Экспериментально было получено, что в режиме нормального ускорения при переходе с растущего поля в режим "стола", а затем в режим спада, равновесная фаза сползает на -25° и за счет возбуждения синхротронных колебаний происходят потери интенсивности, составляющие приблизительно 10%. Если снизить амплитуду ускоряющего напряжения на (30 - 40)%, то потери увеличиваются, приблизительно в (3 - 4) раз. На рис. 1 показана диаграмма $e V_0$ и положение равновесной фазы при ускорении в переходном режиме от растущего магнитного поля через "стол" к спадающему. На этом же рисунке показаны колебания равновесной фазы, которые происходят с частотой пульсаций при ускорении на "столе" магнитного поля, когда амплитуда ускоряющего напряжения снижена до $V_0 = 2,0$ кв. Однако поддержание на контуре, емкостью которого является ускоряющий электрод, таких малых значений амплитуды ускоряющего напряжения приводит к нарушению режима работы системы автоподстройки выходного резонансного контура. Кроме того, уровень собственных шумов усилителя примерно такого же порядка, как и полезный сигнал. В этом заключается трудность применения данного способа получения растяжки на "столе" магнитного поля.

б) Сдвиг фазы в/ч ускоряющего поля на ускоряющих электродах предполагает наличие двух ускоряющих электродов, размещенных в диаметрально противоположных прямолинейных промежутках кольца ускорителя. В нормальном режиме ускорения высокочастотные напряжения на электродах сдвинуты друг относительно друга на 180° и действующая амплитуда "и" ускоряющего напряжения определяется как:

$$U = \sqrt{V_{01}^2 + V_{02}^2 + 2V_{01} \cdot V_{02} \cos(\phi - 180^\circ)} \quad (3)$$

где V_{01} и V_{02} - амплитуды ускоряющих напряжений на электродах;
 ϕ - сдвиг фазы между напряжениями на электродах.

Если $V_{01} = V_{02} = V_0$, то в нормальном режиме ускорения при $\phi = 180$, $U = 2V_0$.

Если осуществить сдвиг фазы ($\phi = 0$), то суммарное воздействие электрического поля на пучок частиц будет равным нулю. В этом случае, сохраняя настройку выходных каскадов усилителя, можно получить эффект исчезновения области фазовой устойчивости во время вывода пучка на мишень. Восстановление фазовых соотношений между электродами приводит к возникновению области устойчивости и повторному захвату оставшихся частиц в последующее ускорение.

В нормальном режиме ускорения допустимая нестабильность разности фаз между напряжениями на ускоряющих электродах может составлять $\pm 20^\circ$. В то же время поддержание суммарной амплитуды $U = 2$ кв $V_{01} = V_{02} = 20$ кв при учете пульсаций \dot{H} на "столе" магнитного поля накладывает достаточно жесткие требования на настройку и нестабильность фазы между напряжениями на электродах $\phi = 0 \pm 5^\circ$.

Превышение этого допуска приведет к появлению области фазовой устойчивости, а, следовательно, и к нарушению режима "бесструктурного" вывода пучка. Техническая сложность и неэкономичность данного способа ограничивают применение его на практике.

в) Выключение в/ч ускоряющего напряжения на "столе" магнитного поля.

После выключения высокой частоты за счет энергетического разброса пучок частиц, имеющий азимутальный размер 120° , начинает заполнять весь азимут ускорителя ^{/в/}

$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = KF \frac{\Delta E}{E} m, \quad (4)$$

где $\Delta\phi$ - расхождение по фазам;

$\frac{\Delta E}{E}$ - энергетический разброс;

m - номер оборота;

$$KF = 2,54 \text{ (при } \beta \rightarrow 1 \text{)}.$$

Так как время замыкания пучка $T_3 = m \cdot T_{\text{обр}}$,

где $T_{\text{обр}}$ - период обращения ступки ($T_{\text{обр}} = 0,7$ мксек),

$$\text{то } T_3 = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \cdot \frac{1}{KF \cdot \frac{\Delta E}{E}} \cdot T_{\text{обр}}$$

Подставив реальные цифры, получим, что $T_3 = 300$ мксек. Замыкаясь по азимуту, пучок частиц под действием слабо меняющегося магнитного поля начинает смещаться либо к внутренней, либо к наружной стенке камеры ускорителя. В данном случае

смещение пучка зависит от знака производной магнитного поля. Размещая на пути пучка соответствующую мишень, можно осуществить медленный вывод вторичных частиц в магнитные каналы физической аппаратуры.

Для обеспечения работы ускорителя еще на один эксперимент необходимо прервать процесс вывода пучка на первую мишень и оставшуюся интенсивность "захватить" в повторный режим ускорения для последующего вывода на вторую мишень. Полезно провести оценку максимально возможного коэффициента повторного захвата в синхротронный режим на "столе" магнитного поля из кольцевого ступка, имеющего энергетический разброс $\pm \frac{\Delta E}{E}$.

Заметим, что интервал времени между первым выключением и повторным включением высокой частоты существенно больше времени замыкания пучка по всему азимуту. Предположим, что к моменту повторного включения высокой частоты плотность распределения частиц в ступке постоянна как по азимуту, так и по радиусу. Считаем, что частота в момент повторного включения находится в строгом соответствии с радиальным положением пучка. Уравнение сепаратриссы в радиальных размерах ρ имеет вид ^{/в/}

$$\frac{\rho}{R_0} = \sqrt{\frac{eV_0}{\pi KFE\beta^4(1-n)^2} (\sin\phi - \phi \cos\phi_0 + \sin\phi_0 - \phi_0 \cos\phi)}, \quad (5)$$

где ρ - отклонение от радиуса R_0 ;

E - полная энергия;

β - отношение скорости частицы к скорости света;

n - показатель спада магнитного поля;

ϕ - фаза.

Остальные обозначения те же, что и в предыдущих формулах. Поскольку в случае ускорения на "столе" магнитного поля $\phi_0 = \frac{\pi}{2}$, то для данного случая имеем

$$\rho = R_0 \sqrt{\frac{eV_0}{\pi KFE\beta^4(1-n)^2}} \cdot \sqrt{1 + \sin\phi}. \quad (6)$$

На рис. (2) представлена форма сепаратриссы, построенной на основании уравнения (6) для конкретного случая: $E = 10,94$ Гэв; $eV_0 = 9,8$ кэв; $KE = 2,54$; $R_0 = 28$ м; $\beta \approx 1$; $n = 2/3$. На этом же рисунке показано положение пучка, "размытого" по всему азимуту ускорителя после выключения высокой частоты и имеющего радиальный размер $b = 4,5$ см.

Коэффициент захвата можно определить из соотношения площадей, занимаемых пучком, охваченных и не охваченных сепаратриссой.

Для определения OA воспользуемся подобием треугольников OAB и OCD , у которых $AB = \frac{b}{2}$ и $OC = \pi$. Найдем уравнение касательной для функции (6) при положительном значении ρ в точке $\phi = -\frac{\pi}{2}$. В окрестности точки $-\frac{\pi}{2}$ фаза $\phi = -\frac{\pi}{2} + \alpha$, а следовательно:

$$\sin \phi = \sin \left(-\frac{\pi}{2} + \alpha \right) = -\cos \alpha. \quad (7)$$

Разложим $\cos \alpha$ в ряд по степеням α и ограничимся двумя членами:

$$-\cos \alpha \approx -\left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right). \quad (8)$$

На основании уравнений (6), (7), (8) и пропорциональности сторон в подобных треугольниках найдем, что

$$OA = \frac{b}{R_0} \sqrt{\frac{\pi KFE \beta^4 (1-\alpha)^2}{2 e V_0}}.$$

Таким образом, после несложных преобразований получим окончательное выражение для коэффициента захвата

$$y = 1 - \frac{b}{R_0} \sqrt{\frac{KFE \beta^4 (1-\alpha)^2}{8 \pi e V_0}}. \quad (9)$$

Подставив реальные цифры для рассматриваемого случая, получим, что $y = 0,82$.

При совмещении двух экспериментов в одном цикле необходимо захватить в повторное ускорение лишь незначительную часть оставшейся интенсивности, необходимую для проведения камерной работы.

Осуществление такого режима сопряжено как и в первом методе с двумя принципиальными трудностями.

1. При выключении высокой частоты в системе автоподстройки выходных каскадов мощных усилителей возникает невозстанавливаемый режим, при котором ток в обмотке подмагничивания ферритов контурной индуктивности спадает до "0", и к моменту повторного включения высокой частоты контур оказывается настроенным на частоту, существенно отличную от необходимой частоты в момент повторного захвата.

2. В связи с тем, что после выключения высокой частоты пучок меняет свое радиальное положение, то частота в момент повторного включения будет несколько отличаться от частоты в момент первого выключения.

При восстановлении режима ускорения необходимо сохранить настройку контура, соответствующую первому моменту выключения частоты. Это осуществляется "запоминанием" тока подмагничивания. В момент первого выключения высокой частоты вход

предварительного усилителя постоянного тока (УПТ) отключается от выхода фазового детектора системы автоподстройки и подключается к вспомогательному делителю напряжения. Напряжение смещения подбирается таким образом, чтобы к моменту повторного включения высокой частоты контур был настроен в резонанс с частотой в момент первого включения. При повторном включении высокой частоты выход фазового детектора вновь подключается к УПТ. Коммутация осуществляется при помощи поляризованного реле РП-4, обмотки которого включены в анодные цепи триггера с двумя устойчивыми состояниями. Управление триггером осуществляется импульсами, синхронизированными с первым выключением в/ч и повторным включением.

Как уже отмечалось, при осуществлении повторного захвата частиц необходимо изменить частоту включения таким образом, чтобы она соответствовала радиусу, на котором в момент захвата находится пучок частиц. Такой режим обеспечивается при помощи функциональных манипуляторов, осуществляющих программное изменение частоты ускоряющего напряжения, что приводит к соответствующему изменению радиального положения пучка. Программа изменения частоты должна обеспечить повторный захват пучка частиц и быстрый отвод его от мишени (за время, меньшее полупериода синхротронных колебаний), так как в противном случае пучок может полностью провзаимодействовать с мишенью.

Результаты эксперимента

Эксперимент содержал два этапа:

1. Осуществление повторного захвата пучка при отсутствии мишени в камере ускорителя.

2. Осуществление повторного захвата в режиме взаимодействия пучка с мишенью.

Эксперимент при отсутствии мишени проводился с целью измерения коэффициента захвата в повторный режим ускорения на "столе" магнитного поля. На осциллограммах рис. 3 показана огибающая амплитуды в/ч ускоряющего напряжения. На рис. 4 представлен сигнал интенсивности с индукционных сигнальных электродов. Высокочастотное ускоряющее напряжение выключалось на 30 мсек. Из осциллограмм видно, что фронт нарастания амплитуды при повторном включении несколько затягивается. Исчезновение сигнала интенсивности на 30 мсек указывает на то, что пучок заполняет весь азимут ускорителя, в результате чего сигнальные электроды не "чувствуют" наличия пучка в камере. Из осциллограммы также следует, что по крайней мере, не менее 60% частиц группируются в районе области фазовой устойчивости после повторного включения

высокой частоты. Остальные 40% частиц при своем движении по соответствующим фазовым траекториям по-прежнему "размыты" по всему азимуту ускорителя. Отсутствие потерь в сигнале интенсивности говорит лишь о том, что частицы, оказавшиеся за пределами области устойчивости, продолжают циркулировать по камере ускорителя, постепенно смещаясь по радиусу в зависимости от величины \dot{H} . На рис. 5 представлена осциллограмма наведенного на сигнальных электродах сигнала через 5 мсек после повторного включения высокой частоты. Как видно из осциллограммы, азимутальная протяженность сгустка составляет приблизительно 360° .

Захват частиц в повторное ускорение в режиме взаимодействия пучка с мишенью имеет некоторые особенности. Перед выключением высокой частоты пучок должен находиться на радиусе вблизи мишени. Поскольку сигнальные электроды не чувствуют наличия пучка в камере, то получить заданную интенсивность в повторном захвате можно стабилизацией радиального положения пучка перед выключением высокой частоты и соответствующей настройкой длительности взаимодействия пучка с мишенью. На рис. 6 показана осциллограмма сигнала с мишени при взаимодействии ее с пучком. Неравномерность в интенсивности пучка вторичных частиц обусловлена колебаниями первичного пучка по радиусу вследствие пульсаций в напряженности магнитного поля.

На рис. 7 представлена осциллограмма режима повторного захвата при взаимодействии пучка с мишенью. Одним из основных условий оптимального захвата является быстрый отвод пучка от мишени сразу после включения высокой частоты. В данном случае наблюдается спад сигнала интенсивности при повторном захвате, обусловленный взаимодействием пучка с мишенью в процессе формирования пучка во время отвода его от мишени. Однако, несмотря на это, удается захватить интенсивность, необходимую для эксперимента на пузырьковой камере, не мешая в то же время проведению экспериментов со счетчиками.

З а к л ю ч е н и е

Проведенные исследования подтвердили принципиальную возможность режима повторного захвата частиц на столе магнитного поля и совмещения двух физических экспериментов в одном цикле. Подавление пульсаций на "столе" магнитного поля является существенным фактором улучшения совмещенных режимов.

Авторы пользуются случаем выразить благодарность сотрудникам радиотехнического отдела А.П. Царенкову, К.В. Чехлову, С.Н. Юрову, А.И. Рихвической, Ю.М. Старикову, Г.А. Бокову, Г.П. Пучкову за участие в работе по исследованию режима повторного ускорения на "столе" магнитного поля.

Л и т е р а т у р а

1. Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, А.П. Царенков. Отчет ОИЯИ Б-80-819, Дубна, 1981.
2. Г.С. Казанский, А.И. Михайлов, К.П. Мызников, А.П. Царенков. ПТЭ № 15 (1982).
3. Sci. Instr. no 9, 1965.
4. М.С. Рабинович. Труды ФИАН, X, 1958, стр. 37.
5. Г.С. Казанский. Диссертация ОИЯИ, 1984.
6. М.С. Рабинович. Труды ФИАН, X, 1958, стр. 42.

Рукопись поступила в редакционный отдел
16 июня 1988 г.

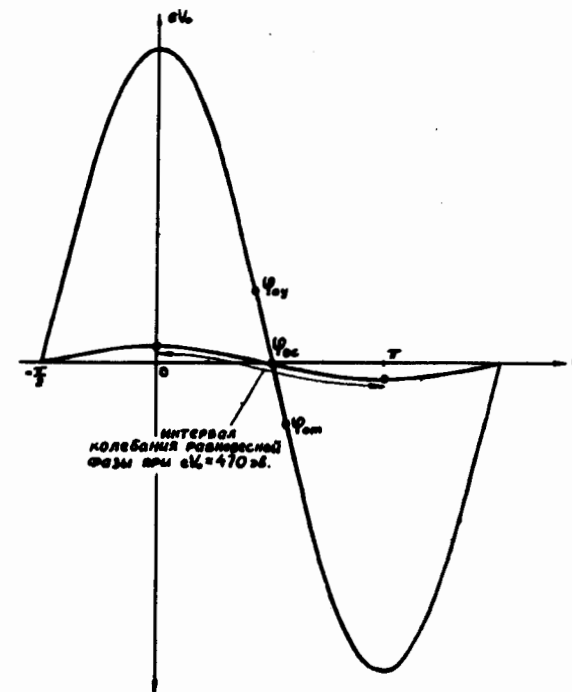


Рис. 1. Положение равновесной фазы при ускорении на растущем поле ϕ_{0y} , на "столе" магнитного поля ϕ_{0c} и на спадающем поле ϕ_{0m} .

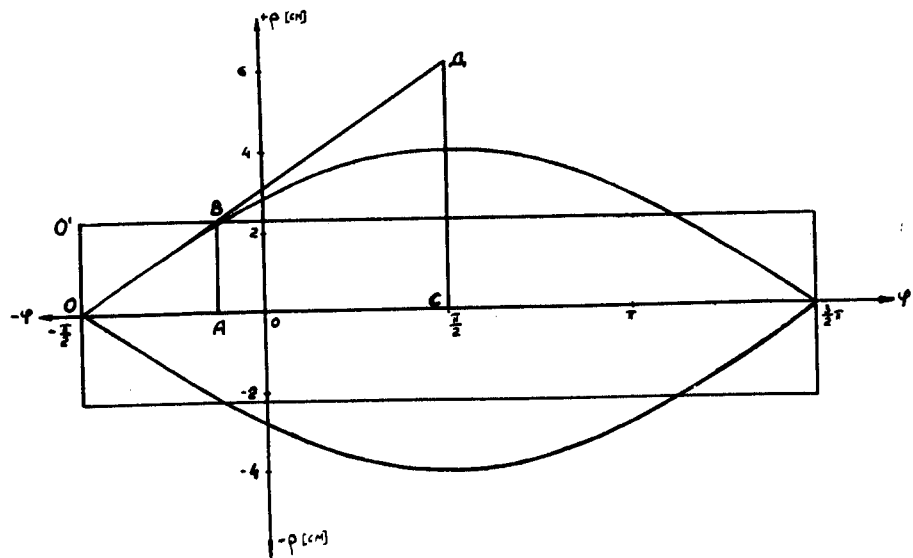


Рис. 2. Сепаратрисса при повторном включении высокой частоты. Прямоугольником обозначен пучок частиц, замкнутый по кольцу ускорителя. Сепаратрисса построена для $E = 10,94$ Гэв и $eV_0 = 9,8$ кэв.

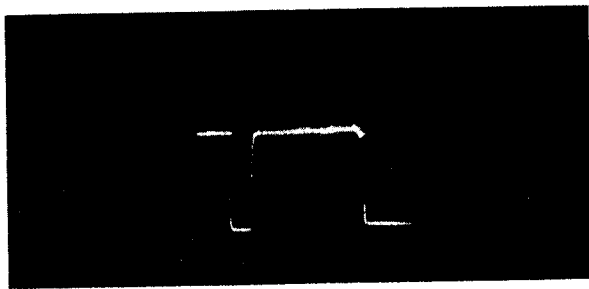


Рис. 3. Огибающая амплитуды ускоряющего напряжения в режиме повторного захвата и ускорения на "столе" магнитного поля.

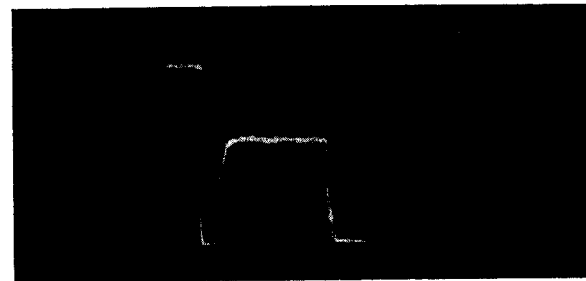


Рис. 4. Сигнал интенсивности с индукционных электростатических электродов в режиме повторного захвата и ускорения на "столе" магнитного поля.

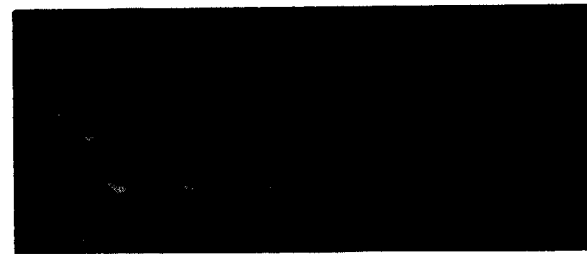


Рис. 5. Осциллограмма наведенного сигнала с индукционных электродов. Сигнал зафиксирован через 5 мсек после начала повторного ускорения.

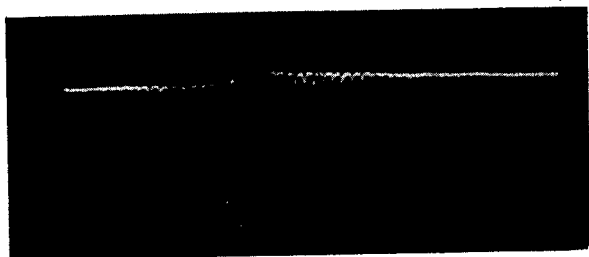


Рис. 6. Осциллограмма сигнала с мишени при выводе пучка частиц в режиме "стола" магнитного поля.

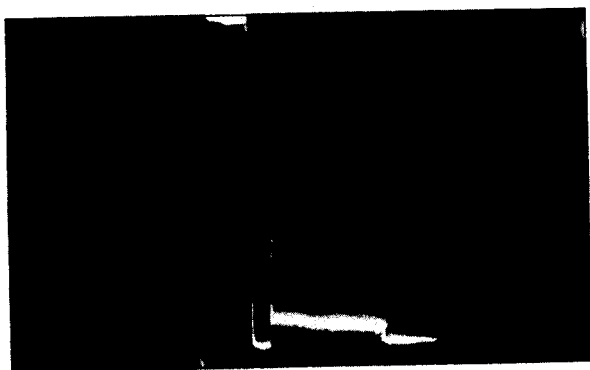


Рис. 7. Сигнал интенсивности в режиме повторного захвата при взаимодействии пучка с мишенью.