

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 537.533.34

ПОВОРОТ НЕМОНОХРОМАТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ
МАГНИТНЫМИ ЗЕРКАЛАМИ

© 2020 г. В. В. Безуглов^а, А. А. Брызгин^а, А. Ю. Власов^а, Л. А. Воронин^а,
М. В. Коробейников^а, С. А. Максимов^а, Р. В. Мелехова^а, В. Е. Нехаев^а, А. В. Пак^а,
В. М. Радченко^а, А. В. Сидоров^а, В. О. Ткаченко^а, Б. Л. Факторович^а, Е. А. Штарклев^{а, *}

^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

*e-mail: shtarklev@gmail.com

Поступила в редакцию 09.09.2019 г.

После доработки 09.09.2019 г.

Принята к публикации 25.09.2019 г.

Описана система для поворота немонахроматичных электронных пучков, состоящая из двух одинаковых магнитных зеркал. Распределение магнитного поля по глубине зеркал сформировано так, что за нарастанием напряженности магнитного поля на входе в зеркало следует ее спад по определенному закону. В результате удается компенсировать угловые расходимости немонахроматичных электронных пучков в зазорах зеркал и получить после поворота пучок с фазовыми характеристиками, близкими к начальным. Приведены расчет и экспериментальные данные испытания такого устройства при повороте электронного пучка на 180° .

DOI: 10.31857/S003281622001019X

1. ВВЕДЕНИЕ

Институт ядерной физики СО РАН разрабатывает и производит импульсные высокочастотные ускорители электронов типа ИЛУ для применения в промышленных и исследовательских радиационно-технологических установках. Как правило, ускоренный немонахроматичный электронный пучок, проходя вдоль оси ускорителей ИЛУ, выводится в атмосферу вертикально, но некоторым заказчикам по технологическим соображениям необходим выпуск пучка под углом к оси ускорителя. Для осуществления таких задач представляется целесообразным обеспечить поворот ускоренного пучка в выпускном канале ускорителя. Для поворота немонахроматичного электронного пучка авторы данной статьи предлагают использовать так называемые магнитные зеркала [1].

Магнитное зеркало представляет собой дипольную отклоняющую систему с двумерным распределением магнитного поля, которое создается магнитными полюсами, вытянутыми в одном направлении. Первые задачи поворота пучка заряженных частиц с учетом поля на краях магнитного диполя, а также динамика движения заряженных частиц в нарастающих плоских магнитных полях были рассмотрены в работе [2].

На рис. 1 показана схема поворота пучка в магнитном зеркале M_1 . Областью задания входного угла α является область 1. Эта область лежит в

пределах от 0° до практически 90° и характеризуется тем, что при входе в магнит пучок электронов дефокусируется. Область 2 является областью отрицательных ($-\alpha$) углов входа в магнитное зеркало и характеризуется фокусирующим действием нарастающего поля на входе пучка в магнит. Этот эффект подробно описан в работах по электронной спектроскопии и в данной статье не рассматривается.

В связи с тем что при входе в магнитное зеркало (область 1) пучок рассеивается по ширине щели зеркала, ахроматические поворачивающие или смещающие магнитные системы, существующие на данный момент, содержат, помимо плоских поворотных магнитов, еще и фокусирующие элементы, например квадрупольные линзы [3, 4]. К недостаткам таких систем поворота пучка от-

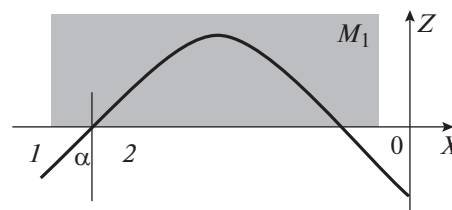


Рис. 1. Области углов входа пучка в магнитное зеркало M_1 .

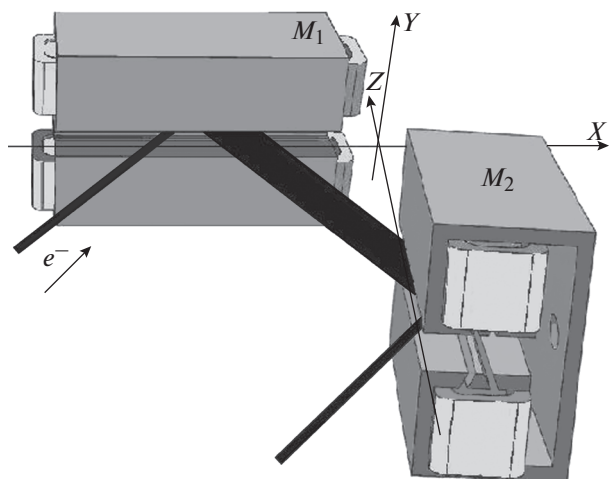


Рис. 2. Схема поворота пучка на 180° . M_1 , M_2 — магнитные зеркала.

носятся их громоздкость, а также трудности при подборе оптимальных параметров большого числа элементов оптической системы, особенно при изменении энергетических характеристик пучка.

В данной статье предлагается магнитная система для ахроматического поворота пучка, состоящая из двух одинаковых магнитных зеркал с таким распределением магнитного поля по глубине зеркала, при котором сразу за нарастанием напряженности магнитного поля в начале магнита следует ее спад по определенному закону [5]. Этот спад позволяет компенсировать входное рассеивание пучка.

2. РАСЧЕТ ПОВОРОТА ПУЧКА В СИСТЕМЕ ДВУХ МАГНИТНЫХ ЗЕРКАЛ

Рассмотрим систему из двух магнитных зеркал M_1 и M_2 для поворота пучка, например, на 180° (рис. 2). В первый магнит (M_1) пучок входит под углом 45° . Поскольку магнитное зеркало имеет плоское магнитное поле, то для определения трехмерного распределения магнитного поля в зеркале был применен метод аппроксимации поля в плоскости симметрии зеркала отрезками кривых второго порядка. Также были проведены расчеты движения пучка в магнитных зеркалах методом траекторного анализа.

Для этого была численно решена система скалярных уравнений для проекций векторного уравнения движения электронов в магнитном поле. Расчет проводился для электронного пучка с энергией электронов до 2 МэВ и произвольно выбранной монохроматичностью. Трассировалось 1000 траекторий в двух одинаковых магнитных зеркалах, M_1 и M_2 , с выбранными распределениями магнитного поля в плоскости симметрии зер-

кал: $B(z)$ для M_1 и $B(x)$ для M_2 . Входной диаметр пучка составил 1.5 см, пучок имел гауссово распределение плотности тока и нулевую начальную угловую расходимость.

При рассмотрении трехмерного движения частиц в зеркалах целесообразно проводить расчет траекторий частиц для двух групп проекций, как и принято для дипольных магнитов. Первая группа, в радиальной плоскости симметрии (для M_1 это ZX), представляет собой поворот пучка на 90° , вторая группа, в аксиальной плоскости (XY для зазора магнита M_1), описывает фокусировку и дефокусировку электронного пучка (см. рис. 2).

В ходе траекторных расчетов поворота пучка были опробованы различные формы распределения магнитного поля по глубине зеркала. Численный расчет показал, что распределение с линейно нарастающим до максимума, а затем линейно спадающим (примерно на 30% от максимума) магнитным полем позволяет компенсировать дефокусирующий эффект на входе в магнитное зеркало, и пучок после поворота имеет фазовые характеристики, близкие к начальным.

На рис. 3 приведена форма распределения магнитного поля, подобранная для ранее указанных параметров пучка. Максимальное значение магнитного поля нормировано на единицу. Залитая серым фоном область ($a-b-c-d$) — это область взаимодействия магнитного поля зеркала со всеми частицами пучка с выбранными параметрами.

На частицу при входе в зеркало M_1 , кроме основной составляющей магнитного поля, поворачивающей частицу в плоскости XZ , действует составляющая поля в плоскости XY . Эта составляющая знакопеременна и приводит к фокусировке или дефокусировке пучка в зазоре зеркала. На участке $a-b$ происходит дефокусировка, а на участке $b-c-d$ — фокусировка пучка в аксиальной плоскости.

Длина нарастания магнитного поля в зазоре T_1 определяет величину начального расширения пучка в зазоре магнитного зеркала. Каждый линейный участок распределения поля формирует цилиндрическую линзу: участок $a-b$ — дефокусирующую линзу, участок $b-c-d$ — две фокусирующие линзы. Частицы до достижения максимальной глубины входа в зеркало сначала дефокусируются (участок $a-b$), а затем фокусируются на участках $b-c$ и $c-d$. Для минимальных энергий спектра основная фокусировка происходит на участке $b-c$. Для максимальной энергии спектра 2 МэВ фокусирующая область максимальна по глубине — это участок $b-c-d$.

На рис. 3 также приведены проекции электронных траекторий в зеркале (рис. 3б) и кривая распределения магнитного поля $B(z)$ в нем (рис. 3а), со-

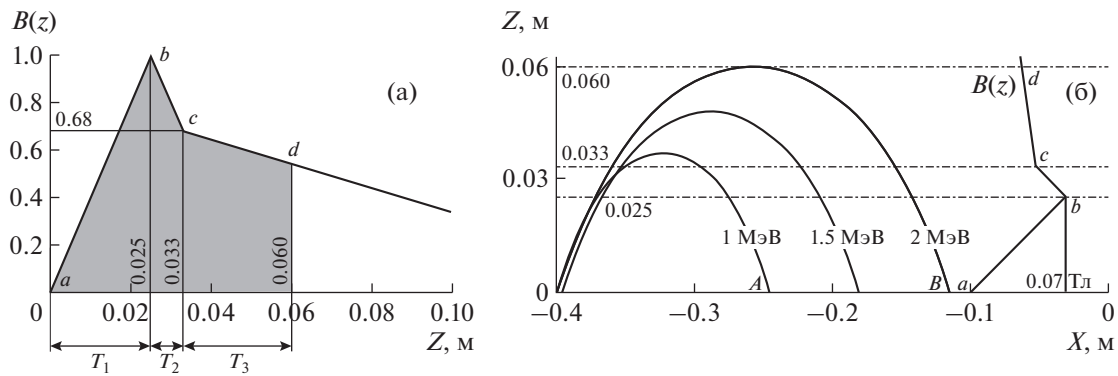


Рис. 3. Распределение магнитного поля по глубине зеркала (а) и проекции электронных траекторий в зеркале M_1 (б).

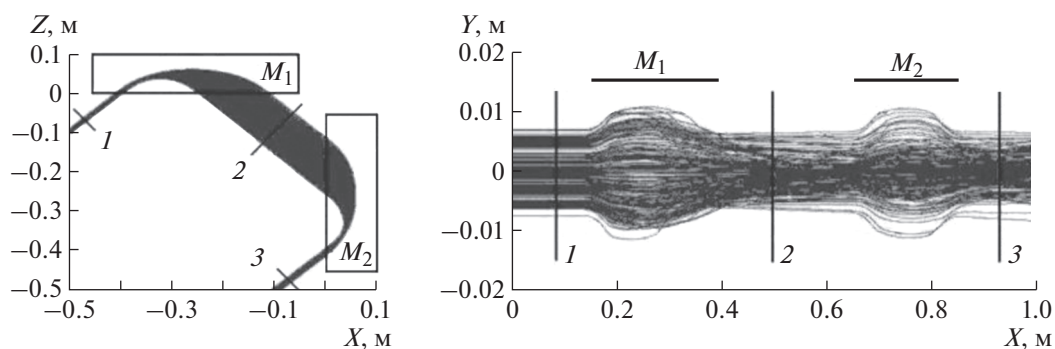


Рис. 4. Радиальное сечение (слева) и развертка аксиального сечения (справа) поворота пучка на 180° .

стоящая из трех участков: нарастающего $a-b$ и спадающих $b-c$ и $c-d$. Длина магнитного зеркала определяется радиусом поворота электронов с энергией 2 МэВ и для данного распределения $B(z)$ равна 0.29 м (см. рис. 3). Из этих же кривых следует, что максимальная величина глубины входа пучка в зеркало равна 0.06 м. На выходе из магнита M_1 в плоскости XZ мы получаем повернутый на 90° и разложенный по спектру пучок шириной 0.14 м (расстояние AB на рис. 3б). Угловые коэффициенты нарастающего участка поля и его первого спада выбраны одинаковыми. Максимальная индукция магнитного поля в зазоре зеркала составила 0.07 Тл. Во втором магнитном зеркале M_2 происходит доворот пучка еще на 90° и его обратная трансформация к входным радиальным размерам.

Расчетная радиальная проекция пучка на плоскость симметрии зеркал (плоскость XZ), расположение зеркал M_1 и M_2 , а также аксиальная проекция развертки электронных траекторий на плоскость XY при повороте пучка на 180° показаны на рис. 4. Согласно рисунку, магнитное поле предложенной формы поворачивает пучок на 180° в плоскости XZ , а в плоскости XY происходит дефокусировка и фокусировка пучка, пучок рас-

ширяется примерно в 1.5 раза при входе в магнитные зеркала и затем возвращается к исходным аксиальным размерам при выходе из них.

В данной статье приведены только основные результаты расчета поворота пучка на 180° , более подробная методика расчета и выбор параметров поворотного магнита рассмотрены в [6]. Описанный выше принцип формирования поля по глубине магнитного зеркала позволяет поворачивать электронные пучки с выбранным разбросом энергий на любой угол без потерь, обусловленных дефокусировкой пучка в аксиальной плоскости поворотного магнита. Аналогичные расчеты были проведены, в частности, для поворота пучка на 90° и 270° .

3. КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВОРОТА ПУЧКА НА 180°

Проверка изложенного выше принципа ахроматического поворота электронного пучка проводилась на импульсном высокочастотном ускорителе электронов ИЛУ-7, разработанном в ИЯФ СО РАН. Конструкция магнитных зеркал для поворота пучка была разработана с учетом известных параметров генерируемого ускорителем

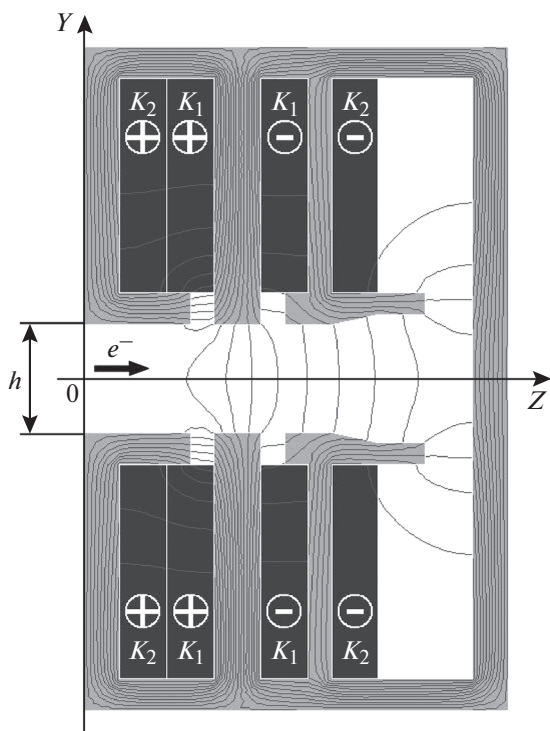


Рис. 5. Конструкция магнитного зеркала в сечении. K_1 , K_2 — соответственно внутренние и внешние пары катушек, h — ширина щели зеркала.

ИЛУ-7 электронного пучка. Основной задачей при выборе конструкции магнитного зеркала было получение формы распределения магнитного поля по глубине зеркала, близкой к распределению из трех линейных участков, описанному ранее (см. рис. 3). Была разработана конструкция магнитного зеркала, представляющая собой ш-образный магнитопровод из стальных пластин (сталь 3) с двумя парами катушек — внутренних K_1 и внешних K_2 (рис. 5).

Две пары обмоток вместе с полюсами магнитопровода формируют требуемую форму распределения магнитного поля по оси Z в щели зеркала шириной h . Протяженность полюсов магнитов составила 50 см, глубина магнита — 16.5 см (ось Z), высота — 31 см (ось Y), на каждой из четырех катушек намотано по 270 витков, толщина намотки — 2 см, высота — 10 см. Выбранный размер щели определяется параметрами пучка ускорителя ИЛУ-7 и равен 5 см.

На рис. 6 приведены расчетные распределения магнитного поля по глубине зеркала (в относительных единицах) для нескольких размеров щели зеркала. Анализируя эти зависимости, можно сделать вывод, что при увеличении зазора между полюсами магнита форма распределения магнитного поля по глубине зеркала начинает все больше отличаться от ранее рассмотренной формы

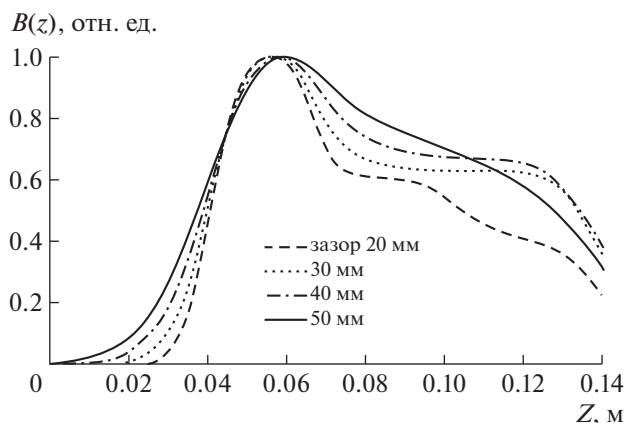


Рис. 6. Расчетные распределения магнитного поля по глубине зеркала для разных размеров щели зеркала.

поля, состоящей из прямолинейных участков (см. рис. 3), фронты распределения становятся более пологими.

Тем не менее, траекторные расчеты движения пучка показали возможность применения всех приведенных на рис. 6 форм распределения магнитного поля для осуществления ахроматического поворота пучка. Таких результатов удалось добиться благодаря возможности регулировки спада распределения магнитного поля путем изменения значений ампервитков внутренних и внешних катушек относительно друг друга. Экспериментально такая возможность реализуется за счет независимого питания двух пар катушек магнита, внутренних и внешних, от двух источников постоянного тока.

При этом главным правилом при выборе параметров магнитного зеркала для ахроматического поворота пучка является равенство дефокусирующих и фокусирующих аксиальных сил, воздействующих на пучок в магнитном поле зеркала.

На рис. 7 приведен чертеж установки для поворота ахроматического пучка на 180° , состоящей из импульсного ускорителя ИЛУ-7, двух магнитных зеркал и вакуумного поворотного канала для транспортировки пучка (размеры указаны в миллиметрах). Толщина стенок поворотной вакуумной камеры из нержавеющей стали 12Х18Н10Т составляет 2 мм, при этом ширина камеры по вакууму равна 45 мм, высота — 146 мм (обусловлена размером AB на рис. 3б).

4. ПОВОРОТ ПУЧКА УСКОРИТЕЛЯ ИЛУ-7 НА 180°

Эксперимент проводился на ускорителе ИЛУ-7 в два этапа. Параметры ускорителя: энергия электронного пучка до 2 МэВ, импульсный ток пучка

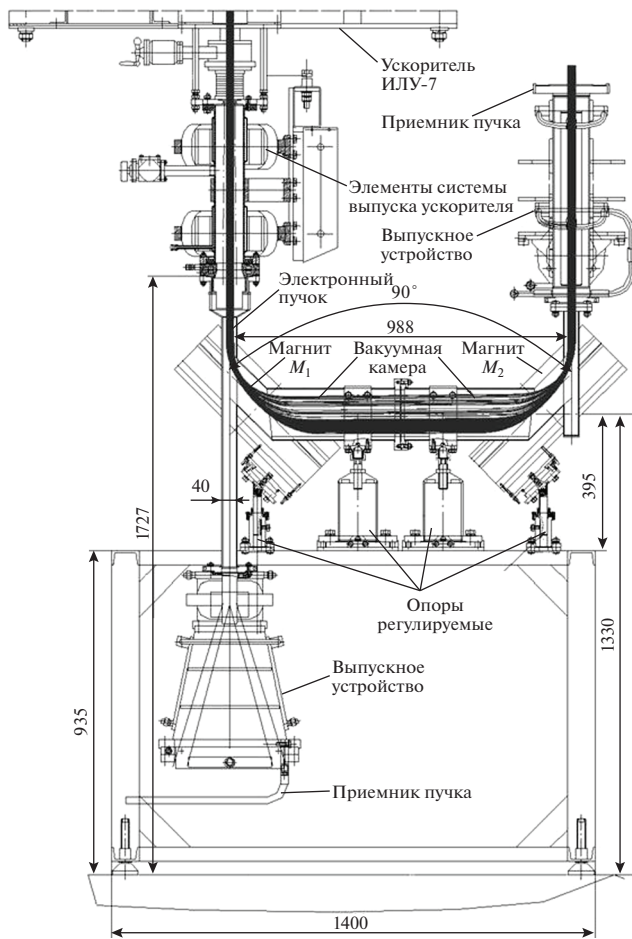


Рис. 7. Общий вид установки для поворота пучка.

100 мА, длительность импульса тока пучка 400 мкс, частота повторения импульсов тока пучка 2 Гц. Сначала был выполнен поворот пучка на 90° в одном магнитном зеркале. Магнит был расположен

под углом 45° к оси движения пучка в выпускном канале ускорителя. После прохождения половины поворотного канала пучок через титановую фольгу выводился в атмосферу и попадал на водоохлаждаемый приемник пучка (коллектор). Весь поворотный канал был изолирован от остальной части ускорителя.

Таким образом, во время эксперимента постоянно снималось два основных сигнала: ток пучка, попадающего на коллектор, и ток пучка, попадающего на стенки поворотного канала. Внешние катушки, так же как и внутренние, были соединены последовательно и запитаны от отдельных источников постоянного тока. Ток питания внешних катушек составил 2.8 А, внутренних — 1.6 А. Эти величины были подобраны во время эксперимента как оптимальные для достижения минимального тока пучка на стенки поворотного канала и максимального — на коллектор, токопрохождение составило 92%.

На рис. 8а приведена осциллограмма эксперимента с двумя сигналами: током пучка в поворотном канале и током пучка на коллекторе после поворота. На рис. 8б показано распределение магнитного поля по глубине зеркала при экспериментальных значениях токов в катушках. Следует отметить, что перед поворотом пучка был проведен эксперимент с незапитанными катушками магнитного зеркала, т.е. был осуществлен прямой выпуск пучка на нижний коллектор. При этом токопрохождение составило те же 92%. Из этого можно сделать вывод, что при повороте пучка на 90° удалось избежать потерь пучка, связанных с самим поворотом.

При помощи дозиметрической пленки, установленной на титановой фольге, был снят отпечаток пучка после поворота на 90° (рис. 9б), размер выпускной щели в канале после поворота на

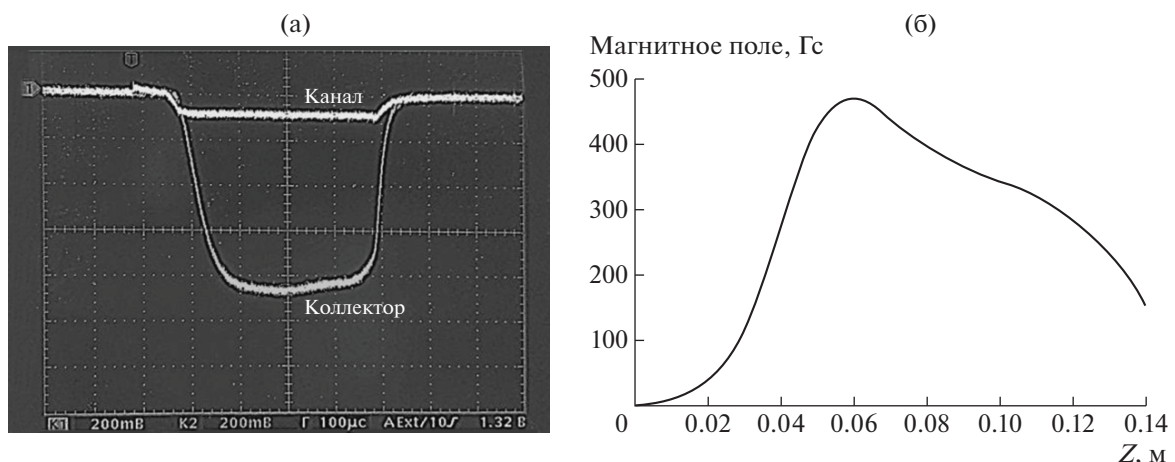


Рис. 8. Осциллограмма токов пучка при повороте на 90° (а) и распределение магнитного поля в зеркале (б).

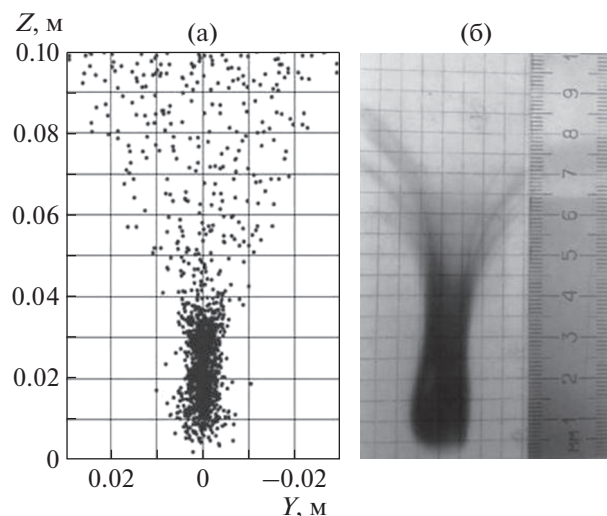


Рис. 9. Расчетный (а) и экспериментальный (б) отпечатки пучка после поворота на 90° .

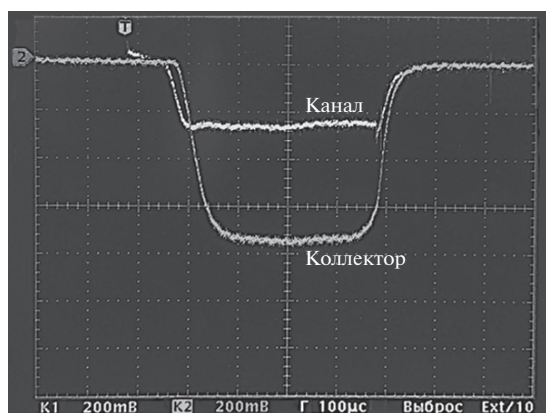


Рис. 10. Осциллограмма токов пучка при повороте на 180° .

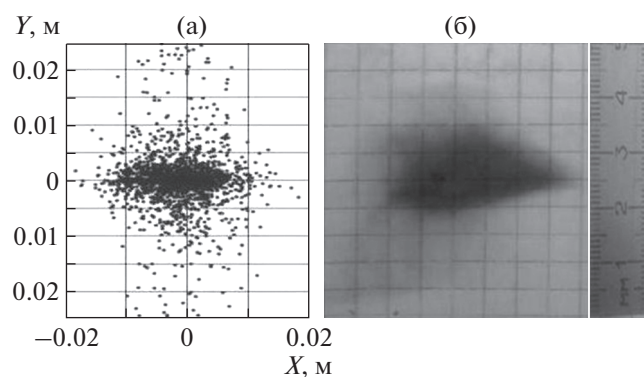


Рис. 11. Расчетный (а) и экспериментальный (б) отпечатки пучка после поворота на 180° .

90° составил 130×45 мм. Для сравнения на рис. 9а также приведен расчетный отпечаток пучка, расчет был проведен при тех же параметрах пучка и магнитного зеркала, что и эксперимент.

На втором этапе эксперимента был полностью собран поворотный канал установки и осуществлен поворот пучка на 180° . Так же как и в первом эксперименте снималось два сигнала: ток пучка на поворотном канале и ток пучка на верхнем коллекторе, расположенном после выхода пучка из поворотного канала в атмосферу. Токи питания катушек первого магнита (M_1) составили: 2.82 А для внешних катушек и 1.55 А для внутренних (что практически совпадает с токами питания в первом эксперименте); второго магнита (M_2): 2.69 А и 1.61 А соответственно. Токопрохождение составило 73%. На рис. 10 приведена осциллограмма эксперимента с двумя сигналами: током пучка в поворотном канале и током пучка на коллекторе после поворота. Также был снят отпечаток пучка после поворота на 180° на выпускной фольге. На рис. 11 приведены экспериментальный (рис. 11б) и расчетный (рис. 11а) отпечатки пучка.

Таким образом, при повороте пучка на 180° потери по току пучка составили 19%, причем пучок теряется на стенках вакуумной камеры во время прохождения второй половины поворотного канала. Этот эффект можно объяснить, проанализировав отпечаток пучка, полученный после поворота на 90° (см. рис. 9). На нем четко видно распределение пучка по энергиям: более высокие энергии образуют плотный след в нижней части отпечатка, не превышающий по ширине 1.5 см, в то время как низкие энергии спектра образуют в верхней части отпечатка хвосты, расходящиеся по всей ширине щели.

При дальнейшем движении пучка на прямом участке поворотного канала до второго магнитного зеркала эти хвосты, расширяясь в аксиальной плоскости, оседают на стенках вакуумной камеры. Для подавления этого эффекта в дальнейшем необходимо либо увеличивать размеры вакуумной камеры поворотного канала, либо улучшать энергетический спектр пучка.

5. ВЫВОДЫ

На основе высокочастотного ускорителя электронов ИЛУ-7 была изготовлена установка, состоящая из двух магнитных зеркал и выпускного вакуумного канала, при помощи которой был выполнен поворот немонахроматического электронного пучка с максимальной энергией до 2 МэВ на 180° . Магнитные зеркала, описанные в данной работе, также позволяют поворачивать немонахроматические электронные пучки на любой дру-

гой угол. Данные поворотные системы могут применяться в промышленных и исследовательских радиационно-технологических установках наряду с другими магнитооптическими элементами ускорителей заряженных частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кельман В.М., Явор С.Я., Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1960. Т. 30. Вып. 2. С. 129.
2. Хургин Я.Л. // ЖЭТФ. 1939. Т. 9. Вып. 7. С. 824.
3. Panofsky Wolfgang K.H., McIntyre J.A. // The Review of Scientific Instruments. 1954. V. 25. № 3. P. 287.
4. Владимирский В.В., Кошкарёв Д.Г. // ПТЭ. 1958. № 6. С. 46.
5. Брызгин А.А., Нехаев В.Е., Радченко В.М., Штарклев Е.А. Патент на изобретение № 2463749 РФ // Оpubл. 10.10.2012. Бюл. № 28.
6. Брызгин А.А., Нехаев В.Е., Панфилов А.В., Радченко В.М., Факторович Б.Л., Штарклев Е.А. Препринт № 2014-15 ИЯФ СО РАН, Новосибирск: 2014.