



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи
УДК 539.17; 621.384.63

13-97-353

А-861

АРТЕМОВ
Александр Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ
С ВНУТРЕННИМИ МИШЕНЯМИ В УСКОРИТЕЛЯХ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ
ДЛЯ НЕВОЗМУЩАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ**

Специальность: 01.04.01 — техника
физического эксперимента, физика приборов,
автоматизация физических исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 1997

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований и Сухумском физико-техническом институте

Официальные оппоненты:

| | |
|---|-----------------------------------|
| доктор физико-математических наук, профессор | ДОНЕЦ Евгений Денисович |
| доктор физико-математических наук, профессор | ПЕРЕЛЬШТЕЙН Элкуно Аврумович |
| доктор физико-математических наук, профессор | ГЛАЗКОВ Анатолий Александрович |

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Московский инженерно-физический институт

Защита диссертации состоится 25 12 " 1997 года в 10³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан 24 11 " 1997 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

М.Ф. Лихачев

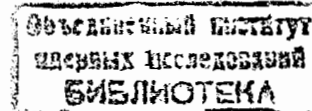
М.Ф. Лихачев

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы и цели настоящей работы.

Необходимость получения достоверной и оперативной информации о параметрах пучка ионов при проведении экспериментов на различных участках современных ускорительно-накопительных комплексов стимулирует поиск невозмущающих методов диагностики. Под невозмущающими обычно подразумеваются методы, когда вносимыми при измерении возмущениями пучка можно пренебречь. Наиболее полное представление о пучке ионов дают измерения тока пучка во времени, его пространственного распределения по сечению канала транспортировки, а также информация об эмиттансных характеристиках, которые связаны с угловым распределением и энергетическим спектром ионов в пучке. Невозмущающий характер измерений большинства этих параметров невозможно реализовать при использовании традиционных для заряженных частиц методов диагностики. Дополнительное осложнение вызывает важное для пучков высоких энергий требование компактности диагностических устройств. Кроме того, разнообразие ускорителей с отличающимися на несколько порядков параметрами вызывает необходимость в создании новых диагностических систем, которые должны быть более универсальными и более быстрыми чем их предшественники. В связи с этим, актуальной задачей является разработка методов и устройств для измерения различных характеристик пучка ионов по вторичным частицам, рожденным при взаимодействии ионов с компонентами остаточного газа или практически прозрачной для пучка внутренней мишенью. Основной задачей связанных с этим исследований является выявление возможности определения необходимых параметров пучка по соответствующим характеристикам данного типа вторичных частиц, а также изучение границ использования основанных на этом методов диагностики и достигаемых при этом точностей.

Помимо этого, в современных ускорительно-накопительных комплексах и при разработке систем транспортировки энергии на большие расстояния интенсивными пучками, широко используется перезарядный метод управления потоками частиц. Формируя внутренние перезарядные мишени на различных участках канала транспортировки пучка можно существенно влиять на распределение частиц в фазовом пространстве и на характер их движения во внешних электромагнитных полях, а также осуществлять удобную для физических экспериментов разводку пучков высоких энергий. Наибольшая эффективность



метода достигается при использовании отрицательных ионов на начальном этапе транспортировки пучка. Это позволяет, в частности, существенно улучшить качество пучка при преобразовании ионов в нейтральные частицы перед участком с наиболее "неприятными" электромагнитными полями, при изменении знака заряда частиц на участках инжекции и вывода пучка в циклических ускорителях, а также значительно расширить возможности и диапазон энергий пучка электростатических ускорителей. Для решения этих задач важна информация об интегральных и дифференциальных сечениях обдирки ионов, коэффициентах преобразования в нужное зарядовое состояние и ресурсе используемой внутренней мишени.

Внутренние мишени широко используются и незаменимы при проведении определённого класса физических экспериментов в циклических ускорителях. К нему относятся эксперименты, проведение которых на выведенном пучке невозможно или осложнено из-за значительного искажения информации каскадными процессами в мишени, существенного искажения характеристик регистрируемых частиц или их поглощения мишенью. Для оптимизации этих экспериментов актуально изучение эволюции параметров пучка при взаимодействии с внутренней мишенью ускорителя, а также роли этого процесса на фоновые условия и достигаемые значения светимости.

Таким образом, изучение и оптимизация взаимодействия ионов с внутренними мишенями, а также разработка методов и устройств для невозмущающей диагностики пучка на их основе, являющиеся целью диссертационной работы, представляют собой развитие нового важного направления в технике физического эксперимента с использованием пучков ускоренных частиц.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Она изложена на 284 страницах машинописного текста и включает 95 рисунков, список работ автора по теме диссертации и список литературы из 305 наименований.

По итогам проведенных в диссертации исследований на защиту выносятся:

- результаты теоретического изучения влияния ленточной геометрии эксперимента на измерение угловых распределений частиц;
- результаты измерения предельной точности соответствия угловых распределений ионов H^- и атомов H^0 в пучке с использованием корпускулярных мишеней;
- результаты исследования влияния поляризации и мощности фотон-

ной мишени на околопороговый развал ионов H^- ;

— измеренные сечения σ_{-10} и σ_{01} на углероде для H^- и H^0 частиц с энергией 2 и 7 МэВ;

— результаты исследования влияния поляризации фотонной мишени на рождение электронов с параметрами угловой асимметрии $\beta_0 = -1, 2$;

— методы и устройства для невозмущающей диагностики пучков отрицательных ионов и нейтральных частиц по электронам фотообдирки;

— результаты изучения влияния тока пучка отрицательных ионов на его диагностику по электронам обдирки;

— метод диагностики пучка ионов по электронам фотоионизации промежуточных быстрых нейтральных частиц;

— проект и результаты расчета радиационно стойкого детектора пространственного распределения импульсного потока быстрых электронов для диагностических устройств;

— корреляционный метод невозмущающей диагностики пучка ионов и устройство для его реализации;

— результаты исследований светового излучения газовых мишеней под воздействием пучка ионов H^- с энергией 100 кэВ ÷ 2 МэВ;

— устройство для невозмущающего измерения пространственных характеристик пучка ионов по световому излучению в канале транспортировки с локальным напуском газа;

— результаты изучения светового излучения на выходе ненагруженных пучком ВЧ-резонаторов линейного ускорителя;

станция внутренних мишеней на нуклотроне;

результаты теоретического и экспериментального исследования взаимодействия ядер с внутренними мишенями на нуклотроне и эволюции параметров пучка.

Апробация результатов и публикации. Основные результаты, приведенные в диссертации, изложены в 44 опубликованных работах, список которых прилагается, докладывались на Всесоюзных и Международных конференциях (Сан-Франциско, США, 6-9 мая 1991; Вашингтон, США, 17-20 мая 1993; Лондон, Великобритания, 27 июня - 1 июля 1994; Таормина, Италия, 30 мая - 4 июня 1994; Ситгес / Барселона, Испания, 10-14 июня 1996), симпозиумах (Уитон, США, 1992; Дубна, Россия, 28 февраля - 4 марта 1995), совещаниях (Харьков, СССР, 28-30 мая 1991; Дубна, Россия, 13-15 октября 1992; Варна, Болгария, 31 мая - 5 июня 1994; Протвино, Россия, 25-27 октября 1994; Варна, Болгария, 18-24 сентября 1995; Дубна, Россия, 19-21 декабря

1995; Созопол, Болгария, 30 сентября - 5 октября 1996), школах (Писки, Польша, 18-28 августа 1993; Варна, Болгария, 12-18 сентября 1994), а также обсуждались на семинарах и научных конференциях Сухумского физико-технического института и Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели исследований, кратко изложено содержание всех глав, а также приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава основана на работах [1-10] и посвящена теоретическому и экспериментальному изучению рождения атомов водорода и электронов при обдирке ионов H^- на внутренних корпускулярных и фотонных мишенях.

Максимальная точность соответствия угловых распределений ионов H^- и атомов H^0 в пучке с использованием корпускулярной внутренней мишени реализуется при её малой толщине, когда обдирка ионов происходит в результате однократных столкновений. Величина этой точности определяется шириной ($G_0 \equiv 2\theta_{1/2}$) на полувысоте угловых распределений $I(\theta)$ атомов H^0 в элементарных актах их раждения. Экспериментальное изучение данных распределений проводилось с использованием различных газовых мишеней ($He, Ar, Kr, Xe, H_2, N_2, CO_2$) в диапазоне энергий ионов $E_{H^-} = 10 \div 300$ кэВ с дискретностью 10 кэВ. В соответствии с теорией при этих энергиях наиболее актуально получение хорошего согласия предсказанных распределений с экспериментом, а при последующем росте E_{H^-} справедлива аналогичная функциональная зависимость $G_0(E_{H^-})$. С учетом ожидаемых величин G_0 эксперименты проводились при использовании ленточных пучков ионов H^- . Проведенные исследования по технике их формирования показали возможность получения достаточно малых геометрических и угловых размеров пучка по рабочей координате, в сочетании с необходимой для измерений интегральной интенсивностью потока ионов и пренебрежимо малой ролью пространственного заряда за счет больших геометрических размеров пучка по другой координате. В данной геометрии эксперимента угловые распределения атомов H^0 измеряются сканированием их потока на пролетной базе Z_s щелевым детектором параллельно плоскости пучка ионов, либо при использовании многоканальной координато-чувствительной системы регистрации. Результаты численного моделирования для аксиально симметричного

рассеяния, представленные в разделе 1.1, показывают, что регистрируемые распределения $I_s(\theta_s)$, где θ_s - угол в направлении сканирования, могут значительно отличаться от $I(\theta)$. При этом степень проявления геометрии эксперимента существенно зависит от функциональных особенностей измеряемого углового распределения и это необходимо учитывать при обработке экспериментального материала. Данный геометрический фактор можно количественно характеризовать отношением $\theta_{s1/2}/\theta_{1/2} \equiv K$, где $2\theta_{s1/2}$ - ширина на полувысоте распределения $I_s(\theta_s)$, зависящая от энергии ионов. В качестве примера полученных при численном моделировании результатов на рис.1 приведена зависимость $K(\theta_{s1/2})$ для распределения $I(\theta) \propto [1 + (\theta/G)^2]^{-\xi}$ ($\xi = 1, 3/2$) и геометрии проведенных экспериментов ($a = 5$ мм, $b = 2$ мм, $Z_s = 10^4$ мм, $\alpha \approx 2$, $\mu = 3 \div 6$, $\sigma_Y = 2 \cdot 10^{-2}$ мм). При этом $2b$ - длина щелевого детектора, $2a$ и $2\sqrt{2}\sigma_Y$ - характерные геометрические размеры сечения ленточного пучка в области взаимодействия, μ и α - величины, характеризующие расходимость пучка в перпендикулярном и параллельном его плоскости направлениях соответственно.

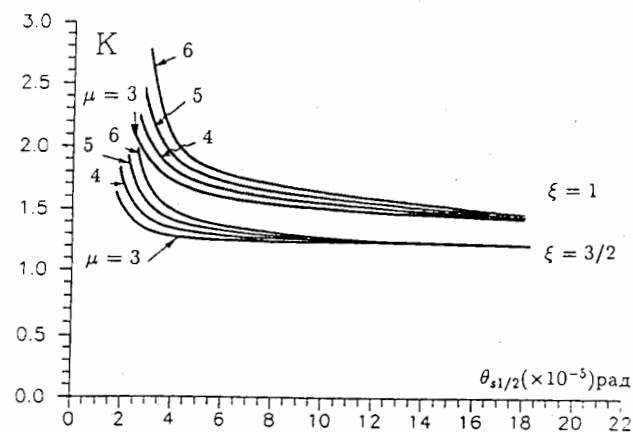


Рис.1. Зависимость K от $\theta_{s1/2}$ для геометрии проведенных экспериментов при $\alpha = 2$ и различных значениях μ и ξ .

В разделе 1.2 приведены результаты экспериментов по обдирке ленточных пучков ионов H^- на газовых мишенях и изучен характер этого взаимодействия. С использованием представленных в предыдущем разделе зависимостей проведена обработка полученного экспериментального материала, результаты которой приведены на рис.2 зависимостью 1. Для сравнения представлена аппроксимация более ранних результатов ($2 \rightarrow G_0 \propto E_{H^-}^{-0,43}$), полученных при обработке того же экспериментального материала без учета геометрии экспериментов. Там

же приведены теоретические (4,5,6 - для различных мишеней) и экспериментальные (3 - H_2, He, Ar, Li ; \blacktriangle - K) данные других авторов.

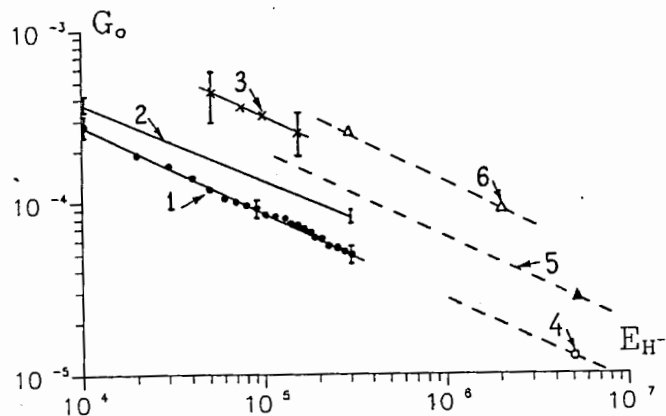


Рис.2. Максимальная точность соответствия распределений атомов H^0 и ионов H^- по углу в пучке в зависимости от энергии ионов для газовых мишеней $He, Ar, Kr, Xe, H_2, N_2, CO_2$ и их аппроксимация зависимостью $G_0(E_{H^-}) = 3 \cdot 10^{-2} / \sqrt{E_{H^-}[\text{эВ}]}$ (1).

Различие в экспериментальных результатах подчеркивает важность выбора правильной методики обработки исходного материала с учетом геометрии. Основываясь на соотношении $\Delta E_0 / E_{H^-} = (2 \div 2,5) G_0$ для ширины на полувьсоте распределений атомов H^0 по энергии, полученная зависимость $G_0(E_{H^-}) = 3 \cdot 10^{-2} / \sqrt{E_{H^-}[\text{эВ}]}$ может быть использована для задач диагностики пучков ионов H^- по атомам H^0 при $E_{H^-} \geq 10$ кэВ.

В разделе 1.3 в рамках модели потенциала нулевого радиуса теоретически изучено влияние поляризации и мощности фотонной мишени на околопороговую обдирку быстрых ионов H^- . Рассмотрены каналы однофотонной и двухфотонной обдирки при энергии фотонов, превышающей однофотонный порог ε_t . Для различных поляризаций излучения и углов пересечения потоков ионов и фотонов (η) получены соответствующие сечения и детально изучены околопороговые парциальные распределения фотоэлектронов в пространстве поперечных импульсов (P_x, P_y) и по энергии (E_e) лабораторной системы отсчета. Примеры таких распределений представлены на рис.3,4. При этом масштаб импульсов нормирован на максимальные величины $P_o = \sqrt{2(\omega - \varepsilon_t)}$ и $P_{ow} = \sqrt{2(2\omega - \varepsilon_t)}$ (в атомных единицах, $|e| = \hbar = m_e = 1$), опре-

деляемые кинематикой однофотонной и двухфотонной обдирки ионов соответственно, α - угол между плоскостью поляризации фотонов и плоскостью их взаимодействия с ионами, ω - энергия фотонов в системе покоя иона. Для удобства сравнения распределений по энергии

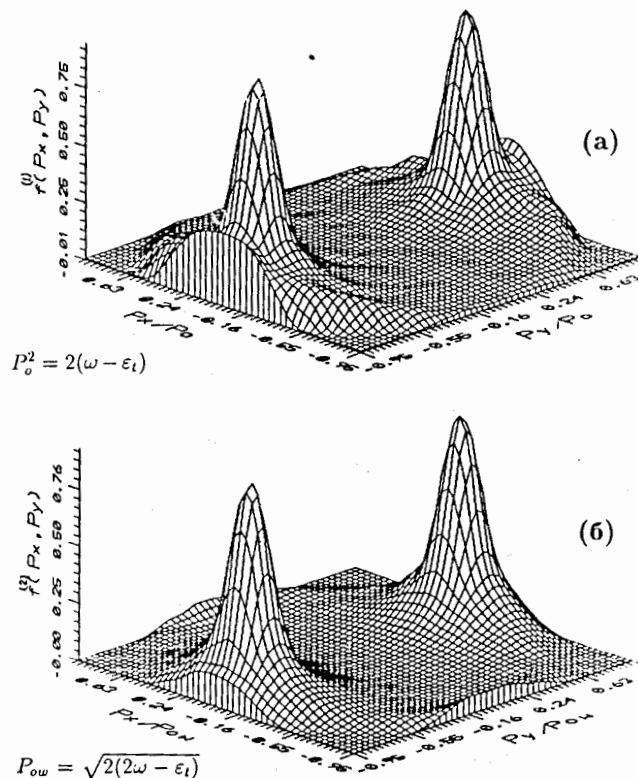


Рис.3. Трехмерное представление нормированных распределений электронов в (P_x, P_y) -пространстве при однофотонной (а) и двухфотонной (б) обдирке ионов H^- с $\alpha = 0, \eta = \pi/4$.

используются безразмерные единицы $XS = [E_e - (\gamma - 1)C^2] / (0, 1\gamma\beta P_o C)$ и $XW = [E_e - (\gamma - 1)C^2] / (0, 1\gamma\beta P_{ow} C)$ для однофотонного и двухфотонного каналов соответственно (C - скорость света, γ и β - релятивистские характеристики иона). Отношение статвесов полученных распределений в мишени с линейной ($W_l^{(i)}$) и круговой ($W_{\pm}^{(i)}$) поляризацией при $0 < \omega - \varepsilon_t \ll \varepsilon_t$ определяется соотношением

$$\frac{W_t^{(1)}}{W_t^{(2)}} = \frac{3}{8} \cdot \frac{W_{\pm}^{(1)}}{W_{\pm}^{(2)}} \approx \frac{15\varepsilon_t^{1.5}(\omega - \varepsilon_t)^{1.5}C}{4\pi \cdot I_{\gamma}} ; \quad (1)$$

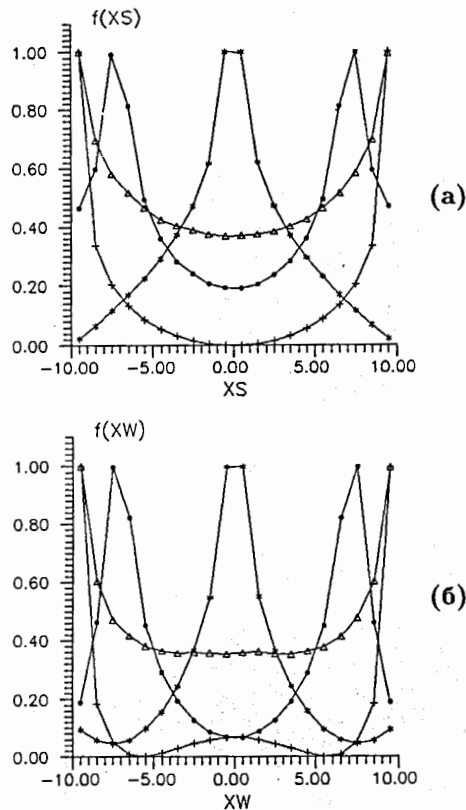


Рис.4. Нормированные собственные распределения электронов по энергии при однофотонной (а) и двухфотонной (б) обдирке ионов H^- с $\eta = \pi/2$: $\alpha = \pi/4$ (\bullet), $\alpha = 0$ ($+$), неполяризованные фотоны (Δ); $\alpha = \pi/2$, произвольное η ($*$).

где I_{γ} - плотность мощности мишени в системе покоя ионов в атомных единицах ($1 \text{ а.е.} = 6,436 \cdot 10^{15} \text{ Вт/см}^2$), а верхние индексы в скобках соответствуют числу поглощаемых фотонов в элементарном акте обдирки. В связи с тем, что при фотообдирке происходит двухчастичный развал иона H^- , $f^{(1),(2)}(\cdot)$, $f(XS)$ - и $f(XW)$ -распределения продуктов развала (электрон, атом водорода) имеют одинаковый вид. Рассчитанные в диссертации парциальные дифференциальные сечения и полученные аналитические выражения позволяют определять результирующие распределения электронов (атомов водорода) для различной мощности мишени и энергий фотонов в представляющей интерес околопороговой области. Для задач диагностики, изменением углов α и

η , предоставляется возможность эффективного управления процессом фотообдирки быстрых ионов H^- на зондирующей фотонной мишени и реализации условий максимального соответствия распределений ионов, электронов и атомов водорода по представляющим интерес проекциям скорости.

В разделе 1.4 обоснована возможность экспериментального моделирования взаимодействия высокоэнергетических ионов H^- с фольговыми мишенями на пучках более доступных низких энергий при аналогичных токовых характеристиках и том же безразмерном параметре взаимодействия $\sigma_{-1d} \cdot \hat{t}$. При этом σ_{-1d} - сечение обдирки иона H^- в различные квантовые состояния атома H^0 , включая непрерывный спектр [см^2]; $\hat{t} = 6 \cdot 10^{23} t / A_0$, t и A_0 - толщина мишени [г/см^2] и её эффективное атомное число соответственно. Описаны схема и результаты проведенных экспериментов по пучково-фольговому взаимодействию при энергии ионов H^- 2 и 7 МэВ, плотности тока пучка $\approx 20 \text{ мА/см}^2$, длительности импульса $\approx 20 \text{ мкс}$ и частоте 0,5 Гц. В экспериментах использовались плёнки из коллоксилина- $\{C_6H_7O_2(OH)(ONO_2)_2\}_n$ толщиной $500 \div 2000 \text{ \AA}$ и углеродная фольга толщиной $2 \text{ мкг/см}^2 (\pm 15 \%)$, нанесённые на металлическую сетку. На основе анализа зарядового состава пучка после углеродной фольги определены сечения обдирки ионов и ионизации рождающихся при этом атомов водорода (σ_{01}). Для энергий 2 и 7 МэВ эти сечения соответственно равны $\sigma_{-1d} = (1,00 \pm 0,16) \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, $\sigma_{01} = (4,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ и $\sigma_{-1d} = (3,5 \pm 0,6) \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, $\sigma_{01} = (1,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$.

В разделе 1.5 проведен сравнительный анализ максимальных точностей соответствия распределений ионов H^- , атомов H^0 и электронов в пучке по энергии и углу при использовании различных внутренних мишеней. Показано существенное преимущество фотонных мишеней.

Вторая глава основана на работах [9–20] и посвящена разработке методов невозмущающей диагностики пучков ионов и нейтральных частиц по электронам однофотонной обдирки.

В разделе 2.1 рассмотрено рождение этих электронов на фотонных мишенях различной поляризации. Для линейной поляризации фотонов в системе покоя ионизируемой неполяризованной частицы этот процесс описывается дифференциальным сечением

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{nl}} = \frac{\sigma_{nl}(\omega)}{4\pi} [1 + \beta_o \cdot P_2(\cos \theta_{ke})] ; \quad (2)$$

где $P_2(x) = 0.5(3x^2 - 1)$; $\sigma_{nl}(\omega)$ - полное сечение фотоионизации (фотообдирки) nl -подоболочки фотоном с энергией ω ; θ_{ke} - угол между на-

правлением вылета электрона и вектором поляризации фотона; β_0 - параметр угловой асимметрии, зависящий от начального и конечного квантовых состояний электрона, матричного элемента перехода между ними, а также энергии поглощаемого фотона ($-1 \leq \beta_0 \leq 2$). Для электронов с $\beta_0 = -1, 0$ показано, что в большинстве случаев точность, с которой они повторяют энергию (в относительных единицах) и направление импульса ионизируемых частиц в лабораторной системе отсчета определяется выражениями ($\hbar = m_e = 1$)

$$\Delta E_e/E_e \approx 2\beta\gamma\sqrt{2(\omega - \varepsilon_i)}/C(\gamma - 1); \quad (3)$$

$$\Delta\theta_e [\text{рад}] \approx 2\sqrt{2(\omega - \varepsilon_i)}/\gamma\beta C; \quad (4)$$

где $E_e = E_u/M_u$; ε_i , E_u и M_u - порог фотоионизации (фотообдирки), кинетическая энергия и масса ионизируемой частицы в атомных единицах соответственно. Выбор оптимально поляризованной фотонной мишени для случая $\beta_0 = -1$ лишь незначительно, например, в $\approx 1,2$ раза по энергии и $\approx 1,4$ раза по проекции импульса улучшает точность соответствия распределений по сравнению с величинами (3) и (4). Распределения электронов с $\beta_0 = 2$ в пределах кинематически определяемых границ в пространстве поперечных импульсов и по энергии лабораторной системы отсчета совпадают с соответствующими распределениями при однофотонной обдирке ионов H^- , детально рассмотренных в разделе 1.3. Достижимая при этом максимальная точность соответствия распределений на оптимально поляризованной фотонной мишени с той же величиной $\omega - \varepsilon_i$ примерно в пять и восемь раз лучше по сравнению со значениями (3) и (4) соответственно.

В разделе 2.2 предложен и детально описан метод фотоэлектронной диагностики пучка (ФЭДП) отрицательных ионов, позволяющий получать информацию о его параметрах с помощью зондирующей фотонной мишени на прямолинейном участке канала транспортировки. Он основан на использовании электронов, рождающихся в результате однофотонной обдирки пренебрежимо малой части ионов пучка вблизи порога ε_i . При этом точность повторения характеристик пучка электронами и предельные возможности соответствующей диагностики определяются параметром угловой асимметрии β_0 (см. раздел 2.1). При формировании фотонной мишени лазерным излучением минимальная величина $\omega - \varepsilon_i$, которую можно реализовать для пучка ионов, определяется в основном разбросом по величине ($\Delta\beta$) и направлению ($\Delta\theta_i$) их скорости и выбирается такой, чтобы сечение околопороговой фотообдирки $\sigma(\omega) \propto (\omega - \varepsilon_i)^q$ ($q = 3/2$ и $1/2$ для электронов в начальном s-

и p- квантовых состояниях соответственно) было одинаковым для всех ионов

$$(\omega - \varepsilon_i)_{\min} \gg q\gamma\omega_0 \{ |\Delta\beta[\beta(1 - \beta \cos \eta)\gamma^2 - \cos \eta]| + |\beta \sin \eta| |\Delta\theta_i| \}. \quad (5)$$

Получены аналитические выражения для плотности мощности мишени, при которой информация о параметрах пучка, переносимая используемыми электронами заметно искажается ($I_{\gamma|\max}$) или полностью "стирается" ($I_{\gamma|cr}$) из-за двухфотонной обдирки ионов. В последнем случае точность измерения характеристик пучка по электронам фотообдирки ограничена величинами, определяемыми из соответствующих выражений при замене $\omega - \varepsilon_i$ на ε_i .

В разделе 2.3 описаны предложенные и разработанные устройства для невозмущающей ФЭДП в области высоких ($0,1 \div 1$ ГэВ/нуклон) и средних ($10 \div 100$ МэВ/нуклон) энергий отрицательных ионов. На рис.5 приведена схема многофункционального устройства для диагностики пучка высокоэнергетических ионов H^- на выходе линейных ускорителей мезонных фабрик (например, 160 и 600 МэВ для МEGАН, г.Троицк). Вывод электронов фотообдирки из пучка ионов и анализ переносимой ими информации осуществляется одним неподвижным магнитным элементом с однородным полем (MA), до и после которого расположены корректирующие магниты $M1$ и $M2$.

Измерение энергетического спектра и продольного эмиттанта пучка ионов осуществляется по известной для магнитных анализаторов схеме (рис.5а), в которой вместо диафрагмирующей щели с помощью лазерного излучения формируется ленточная в плоскости XZ фотонная мишень O с требуемой пространственной локализацией ΔY по оси Y . Спектр ионов по энергии или импульсу восстанавливается по измеренному на детекторе D_{e1} пространственному распределению плотности потока электронов вдоль оси Y_d с учетом пространственного разрешения (d) детектора. Электроны с требуемыми для фазового анализа импульсами достаточно оперативно выделяются диафрагмой D при изменении знака и величины магнитного поля. Продольный эмиттанс пучка ионов определяется по совокупности пространственных распределений выделенных электронов на детекторе D_{e2} после устройства фазовой развѣтки (CDP).

При работе устройства по схеме представленной на рис.5б, в плоскостях параллельных YZ с помощью диафрагмирующих щелей D_n формируется одна, перемещаемая вдоль оси X , или несколько неподвижных ленточных фотонных мишеней с требуемой для измерений

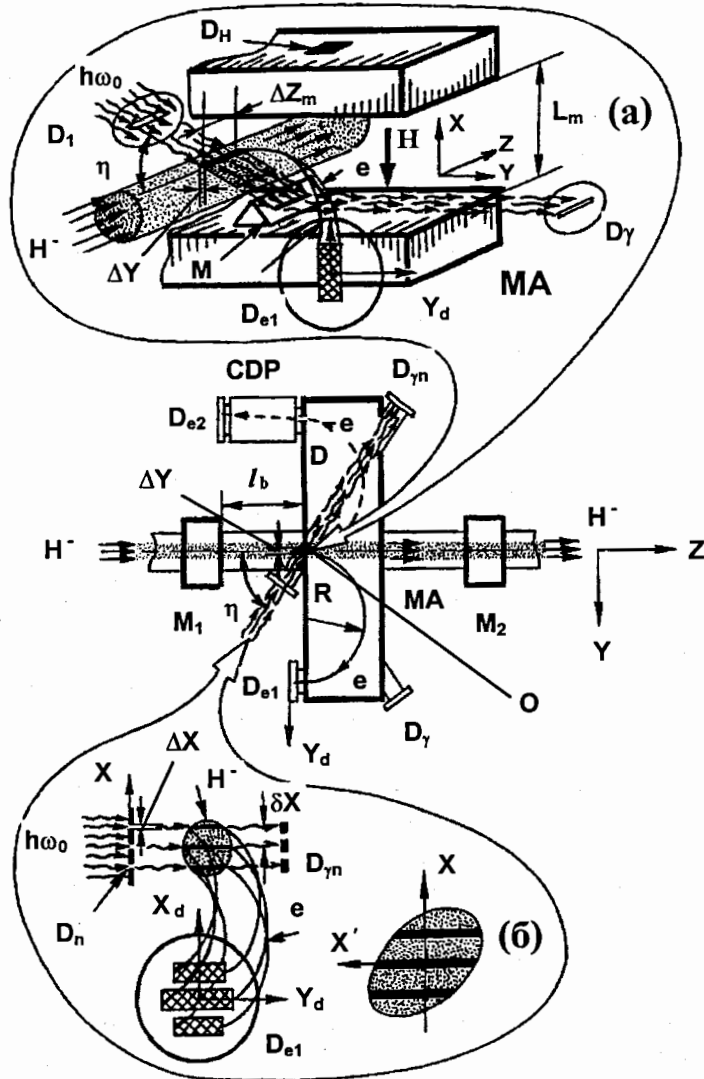


Рис.5. Схема многофункционального устройства для невозмущающей фотоэлектронной диагностики пучка отрицательных ионов высокой энергии.

пространственной локализацией ΔX . В последнем случае допустимое расстояние δX между мишенями определяется условием перекрытия распределений электронов от них на детекторе D_{e1} . Данное расположение мишеней в пространстве сводит к минимуму взаимное влияние углового и энергетического спектров электронов на их распределение вдоль оси X_d в фокальной плоскости анализатора. В соответствии с результатами численного моделирования распределение ионов в $(X'X)$ -фазовой плоскости, X -профиль пучка и его поперечный эмиттанс определяются с помощью соотношения

$$X_d = A \cdot X + B \cdot X'; \quad (6)$$

по измеренным вдоль оси X_d пространственным распределениям потоков электронов при контролируемых характеристиках фотонных мишеней (определяющих вероятность рождения электрона), их угловой ориентации и положения в пространстве по оси X . Данный контроль осуществляется n -канальным щелевым детектором $D_{\gamma n}$, где n - число формирующих диафрагм. Параметры A и B в выражении (6) определяются характеристиками анализатора (его геометрией, юстировкой, краевыми полями) и могут быть измерены, например, в контрольных экспериментах с тестовым электронным пучком.

Проектные характеристики устройства ($d \approx \Delta X \approx \Delta Y \approx 0,1$ мм, $\delta X = 1,5$ мм, $R = 200$ мм, $A = 1$, $B = 0,072$ см/мрад), а также точности пространственно-угловой юстировки фотонных мишеней ($\leq 0,1$ мм, ≤ 3 мрад), стабильности и контроля магнитного поля анализатора ($\delta H/H \leq 3 \cdot 10^{-4}$ при $H = 110$ Э) сориентированы на диагностику сильного пучка ионов H^- ($I_i \approx 50$ мА) на ускорителе МЕГАН с достаточной точностью. Необходимая для измерений точность соответствия распределений ионов H^- , например, при энергии 600 МэВ и электронов их фотообдирки $\Delta X' \approx 5 \cdot 10^{-5}$ рад и $\Delta E_e/E_e \approx 3 \cdot 10^{-2}\%$ достигается на оптимально поляризованных фотонных мишенях (см. раздел 2.2) при $\eta = 41 \pm 0,5^\circ$, которые формируются диафрагмированием излучения Nd : ИАГ лазера ($\omega_0 = 1,17$ эВ). Специальное электронное устройство включает лазер согласованно с пучком ионов во времени и обеспечивает перекрытие импульсов на участке практически постоянной мощности излучения. Оперативность диагностики зависит от измеряемого параметра и мощности сформированных фотонных мишеней. В частности, для разработанного лазера ($I_{\gamma \mu} \approx 20 \div 30$ кВт/см², $\tau_\gamma = 250 \div 500$ мкс, $f_\gamma = 1/5$ Гц) измерение спектра ионов по энергии (импульсу) или их распределения в $(X'X)$ -фазовой плоскости может

быть реализовано за время ≤ 10 мкс. При включении детектора на данное время, со сдвигом относительно начала импульса пучка ($\tau_i \approx 100$ мкс) при последовательных измерениях, предоставляется возможность проследивать изменение данных параметров вдоль импульса за время порядка минуты (10 импульсов мишени). Информация о распределении ионов в продольном ($\Delta P_i/P_i, \Psi$)-фазовом пространстве может быть получена за время ~ 8 минут (~ 100 импульсов лазера) на мишени, обеспечивающей рождение электронов с $\delta\Psi \approx \pm 1^\circ$. При этом потоком фоновых электронов от обдирки ионов на остаточном газе можно пренебречь при включении детектора на время существования фотонной мишени. Относительные потери ионов, пролетающих через область мишени при измерениях, оцениваются величиной $\approx 2 \cdot 10^{-6}$.

Другой вариант устройства с неоднородным магнитным полем ($H \propto 1/r$) разработан и изготовлен для апробации предложенного метода диагностики и оптимизации работы отдельных, общих для обеих устройств, элементов (включая систему синхронизации лазерной мишени с пучком во времени) на пучке ионов H^- с энергией 7 МэВ из ускорителя Сухумского физико-технического института.

В разделе 2.4 рассмотрено влияние поля пучка отрицательных ионов на информацию о его характеристиках, переносимую электронами обдирки после зондирующей внутренней мишени. В модели бесконечного цилиндра с равномерно распределённым по сечению током I_i рассчитаны возмущения компонент импульса электронов при их выводе из пучка 180° магнитным анализатором с однородным полем. Показано, что в используемых на рис.5 обозначениях интегральные возмущения по углу и относительному импульсу электронов на детекторе определяются выражениями

$$\delta X'_b = P_{z|max}(X_o, Y_o) / \gamma \beta m_e c, \quad (7)$$

$$\frac{\delta P}{P} \Big|_b = \frac{e \cdot R \cdot I_i}{\beta \gamma m_e c^3} \int_{Y_o}^{2R+Y_o} \frac{F3(Y)/\beta^2 - F4(Y)}{\sqrt{2R(Y - Y_o) - (Y - Y_o)^2}} dY, \quad (8)$$

где $P_{z|max}$ - максимальное значение функции $P_z(Y) = (2e \cdot I_i / c^2) \cdot X_o \cdot R \cdot [F1(Y)/\beta^2 - F2(Y)]$ для координат рождения электрона в пучке (X_o, Y_o), m_e - масса электрона, $F_i(Y)$ - графические функции, зависящие от параметров X_o, Y_o и R , выраженных (как и переменная Y) в относительных единицах к радиусу пучка ($i = 1 \div 4$). Проведенные численные расчеты, например, для релятивистских ионов с $\beta = 0,79$ ($E_{H^-} = 600$ МэВ) показали, что возмущения на уровне $\delta X'_b \approx 2 \cdot 10^{-4}$

рад и $\delta P/P \Big|_b \approx 2 \cdot 10^{-4}$ возникают при токах пучка $I_i \approx 400$ мА ($R=40$), 550 мА ($R=20$) и $I_i \approx 200$ мА ($R=40$), 300 мА ($R=20$) соответственно.

В разделе 2.5 предложен и теоретически обоснован метод диагностики пучка высокоэнергетических ионов, в котором информация о его параметрах выводится с помощью быстрых нейтральных частиц, образующихся в определённых квантовых состояниях при взаимодействии ионов с внутренней мишенью на участке поворота канала транспортировки пучка. Мишень формируется таким образом, чтобы данные частицы повторяли скорость ионов по величине и направлению с требуемыми для измерений точностями. Параметры пучка определяются в удобном месте за пределами канала транспортировки по электронам, образующимся в результате околороговой избирательной фотоионизации используемого квантового состояния быстрых нейтральных частиц. Для этого может быть использовано, например, приведенное на рис.5 компактное многофункциональное устройство. Рассмотрены возможности такой диагностики на участке перезарядной $H^- \rightarrow H^+$ инжекции в накопительное кольцо мезонных фабрик. Показано, что при выводе информации о параметрах пучка ионов H^- с энергией ≥ 600 МэВ с помощью быстрых атомов H^0 в метастабильном $2s$ -квантовом состоянии может быть достигнута точность соответствия распределений электронов и ионов $\leq 10^{-2}$ % по энергии и $\leq 3 \cdot 10^{-5}$ рад по угловой координате.

Для разработанного и описанного выше диагностического устройства в разделе 2.6 предложен проект и проведены расчеты управляемого радиационно стойкого детектора пространственного распределения импульсного потока релятивистских электронов. Схема детектора

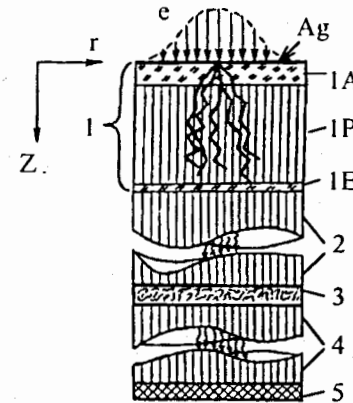


Рис.6.

Схема радиационно стойкого детектора пространственного распределения импульсного потока быстрых электронов. Ag - тонкий слой серебра; 1 - приемная пластина из активного (1A) и пассивного (1P) слоев; 1E - полупрозрачный электрод; 2,4 - оптоволоконные жгуты; 3 - усилитель изображения; 5 - ПЗС-матрица.

представлена на рис.6. Его активный слой 1А из $GaAs$ формирует оптическое изображение проникающего электронного потока с требуемой пространственной точностью. Пассивный слой 1Р в виде оптоволоконной шайбы из аморфного полупроводника GaP выполняет роль поглотителя прошедших электронов, пропускающего без искажения световой поток от арсенида галлия. Тонкий слой серебра и полупрозрачный электрод 1Е из $GaAs$ служат для релаксации радиационного заряда в конвертере 1, улучшения светосбора формируемого оптического изображения и поглощения фонового излучения пассивного слоя. Пространственное распределение потока фотонов от конвертера через кварцевые оптоволоконные жгуты 2 и 4, а также управляемый усилитель изображения 3 на основе микроканальных пластин регистрируется ПЗС-матрицей. Проведен анализ работы элементов детектора в условиях гамма-нейтронной радиации от сильноточного ускорителя мезонных фабрик. Показано, что для проектных параметров линейного ускорителя МЕГАН пространственное распределение импульсного потока релятивистских электронов с ожидаемой интенсивностью $\approx 10^{11}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ может быть измерено с разрешением 100 ÷ 150 мкм за время $\approx 10^{-5}$ с. Ресурс предложенного детектора в соответствующих радиационных условиях оценивается в $\approx 8 \cdot 10^3$ часов непрерывной работы.

В разделе 2.7 предложены метод и устройство для невозмущающей диагностики сильноточного пучка нейтральных частиц малой энергии (десятки ÷ сотни килоэлектронвольт для атомов водорода и дейтерия) по электронам избирательной фотоионизации определённого квантового состояния (например, $H(2s)$, $D(2s)$). Работа устройства основана на измерении величин (P_{e1} , P_{e2}) и разброса (ΔP_{e1} , ΔP_{e2}) импульсов электронов, вылетающих практически в одной плоскости из области фотоионизации с малыми геометрическими размерами и под двумя различными углами (θ_1 , θ_2) относительно оси пучка. При этом сканирование пучка по сечению осуществляется перемещением фокуса лазерного излучения вместе с анализаторами в пространстве. Распределение частиц по импульсу, сечению и в поперечном фазовом пространстве определяется с помощью выражений

$$\Delta P_o/P_o = | [tg\theta_1 \cdot \Delta f_e(\theta_2) - tg\theta_2 \cdot \Delta f_e(\theta_1)] / (tg\theta_1 - tg\theta_2) |, \quad (9)$$

$$\Delta \theta_o = | [\Delta f_e(\theta_2) - \Delta f_e(\theta_1)] / (tg\theta_1 - tg\theta_2) |, \quad (10)$$

где $\Delta f_e(\theta) = [\Delta P_{e1}(\theta) + \Delta P_{e2}(\theta)] / [P_{e1}(\theta) + P_{e2}(\theta)]$, $P_o = M_o \cdot [P_{e1}(\theta) + P_{e2}(\theta)] / (m_e 2 \cos \theta)$ - средний импульс налетающих частиц, $\theta = \theta_1$ или θ_2 , $\theta_2 < \theta_1 < \arcsin[M_o \sqrt{2m_e(\omega - \varepsilon_n)} / m_e P_o]$, ε_n - порог фотоионизации

для используемого квантового состояния, M_o - масса нейтральной частицы. Рассмотрены возможности устройства при его использовании на сильноточном пучке атомов водорода для нагрева плазмы в токамаках (например, $E_o = 400$ кэВ, $j_o \approx 1$ А/см 2) и формировании зондирующей мишени с помощью излучения четвёртой гармоники Nd^{+3} :ИАГ лазера. В этом случае, при частоте включения лазера порядка десяти герц и импульсной мощности излучения ≈ 6 МВт, подробная информация о характеристиках пучка может быть получена за время его квазинепрерывного импульса (несколько секунд).

Третья глава основана на работах [21–25] и посвящена разработке корреляционного метода невозмущающей диагностики пучков ионов.

Физические основы предложенного метода изложены в разделе 3.1. При этом используется такое взаимодействие пренебрежимо малой части ионов с тонкой внутренней мишенью, при котором рождаются вторичные информационные (ИН) частицы, имеющие практически идентичный спектр по величине и направлению скорости и допускающие их избирательную регистрацию без воздействия на пучок. При измерении взаимной корреляционной функции между потоками частиц или фотонов зондирующей мишени, псевдослучайно модулированной во времени, и рождающихся на ней ИН-частиц, регистрируемых на пролётной базе, определяется времяпролётный спектр (распределение по энергии) ионов в выделенном направлении. Показано, что относительный анализ этих функций при различных положениях мишени в пучке и направлениях регистрации ИН-частиц позволяет получить распределение ионов в поперечном фазовом пространстве.

В разделе 3.2 проведен анализ необходимой элементной базы устройства для корреляционных измерений параметров пучка ионов. Рассмотрены возможности формирования внутренней мишени в виде физического генератора "белого" шума частиц или фотонов. Для пучков отрицательных и ряда положительных молекулярных ионов (например, H_2^+ , Cs_2^+ , K_2^+ , Na_2^+ , Xe_2^+ , Pb_2^+ , He_2^+ , Kr_2^+ и др.), допускающих фоторасщепление на зондирующей фотонной мишени, для этих целей можно использовать излучение некоторых твердотельных лазеров с большой шириной линии перехода в многомодовом статистически независимом режиме усиления. В частности, ширина автокорреляционной функции Nd^{+3} :ИАГ лазера в пределах пика свободной генерации достигает величины ≤ 50 пс. Показано, что для высокочастотного детектирования пространственно распределенного потока заряженных или нейтраль-

ных ИН-частиц можно использовать детекторы на основе микроканальных пластин. Рассмотрены характеристики известных устройств для измерения взаимной корреляционной функции оптических и электрических сигналов. Отмечается, что при переходе к многоканальным измерениям возникает необходимость в создании более компактных систем быстродействующих коррелометров для диагностического устройства.

В разделе 3.3 на примере ионов H^- предложено устройство для реализации невозмущающих корреляционных измерений параметров пучка в источнике. Схема устройства приведена на рис.7. Одна перемещающаяся по оси Y или несколько стационарных зондирующих фотонных мишеней с псевдослучайной последовательностью импульсов во времени (рис.7б) формируются в начале поворотного участка на выходе источника диафрагмированием поляризованного излучения от Nd^{+3} :ИАГ лазера ($\lambda \approx 10600\text{\AA}$) в режиме свободной генерации. Тестовые H^0 атомы рождаются в результате фотообдирки пренебрежимо малой части ионов H^- и повторяют величину (в отн.ед.) и направление (в рад) их скорости с точностью $\leq 8 \cdot 10^{-4} E_i^{-0.5}$, где E_i - энергия ионов в килоэлектронвольтах. Взаимные корреляционные функции $R_{sq}^{\gamma_0}$

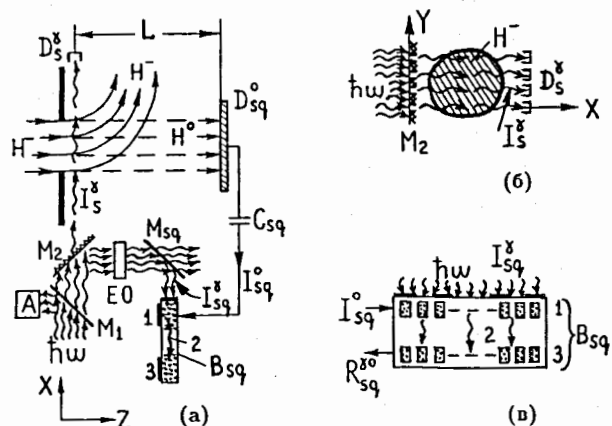


Рис.7. Схема устройства для невозмущающих корреляционных измерений параметров пучка ионов H^- в источнике.

измеряются между потоками фотонов I_{sq}^{γ} от s -ой нитевидной мишени ($s = 1, \dots, n$) и соответствующими ей усиленными электрическими сигналами I_{sq}^o от q -ой ламели ($q = 1, \dots, m$) анодной системы детектора атомов H^0 (D_{sq}^o) на основе микроканальных пластин. Коррелометры

(B_{sq}) с временным интегрированием на приборах с зарядовой связью (ПЗС) состоит из модуляторной и детекторной линеек (рис.7в). ПЗС линейка 1 на основе $GaAs$, в которой каждый третий электрод затвора полупрозрачен, выполняет роль пространственного модулятора падающей на неё части лазерного излучения, распространяющейся в волноводном режиме под электродами затворов параллельно их поверхности. При этом пространственное распределение зарядов, соответствующее дискретному во времени представлению формы входного токового сигнала $I_{sq}^o(t)$, изменяет коэффициент пропускания ячеек из-за эффекта электропоглощения фотонов. Модулированное таким образом лазерное излучение 2 регистрируется кремниевой ПЗС линейкой 3. Пространственное распределение заряда, накопленного в её ячейках за время измерения, представляет корреляционную функцию $R_{sq}^{\gamma_0}$, которую можно затем считать и перевести в масштаб времени при известной скорости переноса заряда вдоль модуляторной ПЗС линейки. Для конкретного типа сильноточного источника показано, что данное устройство позволяет осуществлять невозмущающее измерение распределения ионов H^- по энергии и в поперечном фазовом пространстве ($Y'Y'$) за время ≈ 100 нс и в нужный момент в пределах одного импульса пучка.

Четвёртая глава основана на работах [26-30] и посвящена исследованиям по использованию светового излучения корпускулярных мишеней для невозмущающей диагностики пучка ионов H^- и ВЧ-поля ускоряющих структур линейного ускорителя.

В разделе 4.1 изучена природа светового излучения внутренних газовых мишеней He , H_2 и N_2 под воздействием пучка таких слабозарядных частиц, как ионы H^- . Эксперименты проводились при энергии ионов 2 МэВ, импульсном токе пучка ≤ 30 мА и давлении рабочих газов $\leq 10^{-3}$ Тор. С помощью оптики изображение светящейся области канала транспортировки пучка проецировалось на торец многоканальной (по поперечной координате) световолоконной сборки, каждый канал которой заканчивался своим ФЭУ с усилителем. В проведенных экспериментах показано, что при локальном напуске газа в канал транспортировки пучка и пренебрежимых потерях ионов из-за их обдирки, получаемые токовые сигналы с ФЭУ и распределение их амплитуд по каналам световолоконной сборки адекватно отражают изменение тока пучка во времени и перераспределение по сечению, смещение пучка в поперечном направлении, а также позволяют с высокой чувствительностью фиксировать попадание незначительной части ионов на стенку вакуумной камеры. С учетом полученных результатов предложено ис-

пользовать данное световое излучение для оперативного контроля потерь ионов и оптимального согласования отдельных участков ускорительного тракта с малой энергией пучка.

Предложен высокочувствительный профилометр пучка с одновременной регистрацией излучения от отдельных слоев просматриваемой области пространства.

В разделе 4.2 экспериментально исследованы особенности возбуждения He, H₂ и N₂ ионами H⁻. Показано, что при той же зависимости от энергии в диапазоне 100 кэВ ÷ 2 МэВ отношение сечений излучения этих газов при взаимодействии с ионами H⁻ и протонами близко к трем.

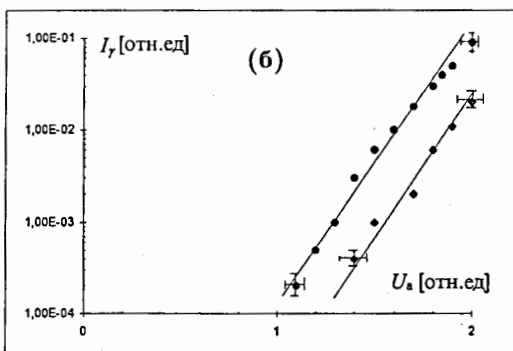
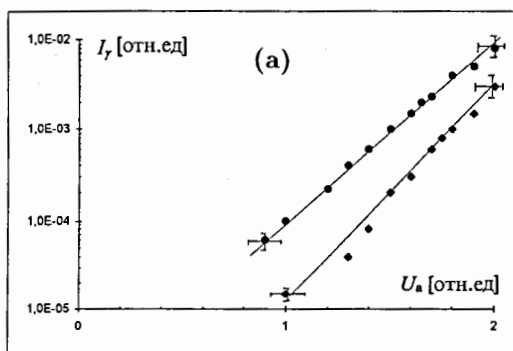


Рис.8. Зависимость интенсивности светового сигнала (I_γ [отн.ед]) от ВЧ- мощности (U_a [отн.ед]) в резонаторах с ПОКФ (а) и ППКФ (б) для различных материалов стенки вакуумной камеры в области регистрации излучения (• - нержавеющая сталь, ◊ - стенка покрыта аквадагом)

В разделе 4.3 изучена природа светового излучения на выходе ненагруженных пучком ВЧ-резонаторов линейного ускорителя с пространственно-однородной (ПОКФ) и пространственно-периодической (ППКФ) квадрупольными фокусировками. Показана сильная зависи-

мость интенсивности излучения от величины ВЧ-поля в них (см. рис.8), материала вакуумной камеры за апертурой резонаторов и независимость этой интенсивности от вакуумных условий в широком диапазоне изменения давления. Данное излучение генерируется электронами автоэмиссии на электродах, выходящими через апертуру резонатора, и может быть использовано для невозмущающего контроля ВЧ-мощности в нем в реальном масштабе времени, а также периодического тестирования стабильности параметров пучка.

Пятая глава основана на работах [31-44] и посвящена изучению, диагностике и оптимизации взаимодействия пучка ядер с внутренними мишенями в синхротронах на примере нуклотрона.

В разделе 5.1 теоретически исследованы особенности взаимодействия ядер с внутренними мишенями в синхротронах. С учетом диффузионных процессов в пучке при многократном прохождении мишени, неупругого ядерного взаимодействия, а также резерфордовского и дифракционного ядерного рассеяния на большие углы (превышающие угловой акцептанс ускорителя на участке локализации мишени) разработан алгоритм расчета усредненных за время цикла светимостей, времени жизни циркулирующего пучка (T_b), а также роста его продольного и поперечных эмиттансов. Конкретные графические зависимости получены для пучков релятивистских ядер нуклотрона и показана важная роль диффузионных процессов в них. Некоторые результаты расчетов представлены на рис.9,10.

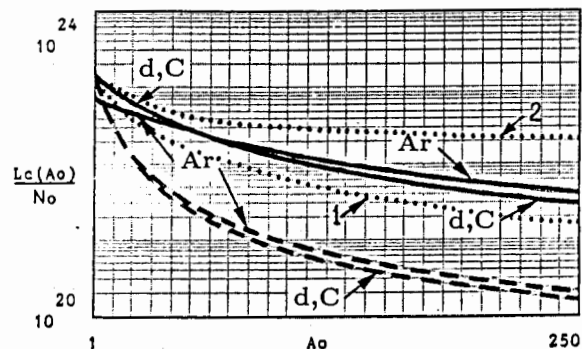


Рис.9. Максимальные величины усредненных за время цикла ($T_c=10$ с) удельных светимостей (L_c/N_0 , N_0 - начальное число частиц на орбите) для различных внутренних мишеней (A_0) и пучков ядер на нуклотроне (— 1 А·ГэВ, - - 6 А·ГэВ). Кривые 1 и 2 получены без учета диффузионных потерь пучка дейтронов с энергией 1 А·ГэВ и 6 А·ГэВ соответственно.

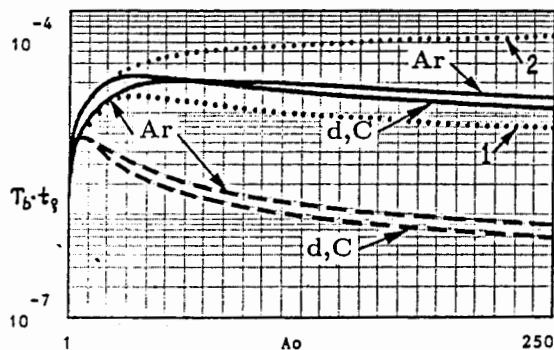


Рис.10. Зависимость функции $T_b \cdot t_g$ [с·г/см²] от массового числа мишени A_0 и её толщины t_g для различных пучков ядер на нуклотроне (— 1 А·ГэВ, — 6 А·ГэВ). Кривые 1 и 2 получены для аналогичных рис.9 условий.

В разделе 5.2 описаны станция внутренних мишеней, используемая в физических экспериментах на нуклотроне, её электронное и программное обеспечение. Управление станцией осуществляется дистанционно с помощью персонального компьютера IBM PC и основано на оперативном представлении информации о цикле магнитного поля, характеристиках пучка и расположении мишеней относительно него на экране монитора. Необходимая пространственно-временная траектория выбранной мишени по отношению к пучку, во временной шкале работы ускорителя, определяется оператором с помощью мыши и обрабатывается шаговым двигателем. Взаимодействие пучка с мишенью во времени контролируется по световому излучению материала мишени под воздействием ионов.

Раздел 5.3 посвящен использованию светового излучения фольговых (CH_2 , Si , Au) и нитевидных (C) мишеней для оперативного контроля относительной светимости во времени и пространственных характеристик циркулирующего пучка дейтронов в физических экспериментах с этими мишенями на нуклотроне. Приведены примеры полученной с помощью ФЭУ текущей информации о высокочастотной структуре пучка (рис.11), а также временной растяжке взаимодействия, соответствующей длительности его циркуляции ($0,3 \div 0,5$ с). Показано, что в случае N-образной внутренней мишени из углеродных нитей (1,2,3 на рис.12) можно определить поперечные размеры пучка и его положение в горизонтальном и вертикальном направлениях за один цикл работы ускорителя. В этом случае, известное расстояние (L_c) между вертикальными нитями 1 и 3 даёт масштаб для определения горизонтального размера пучка независимо от скорости (V_r) равномерного перемещения

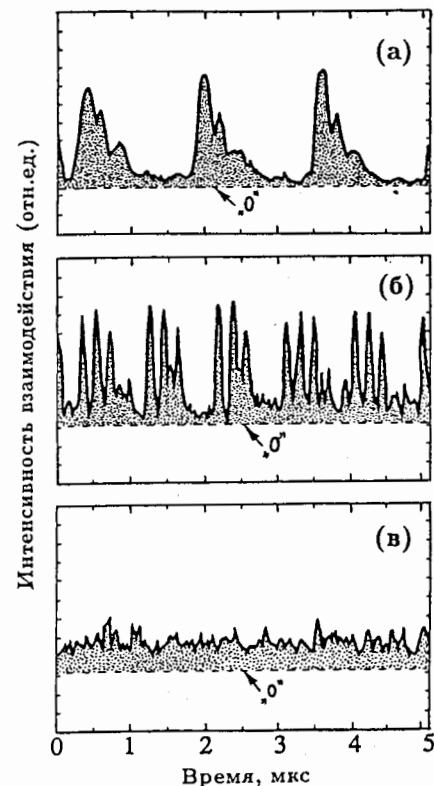


Рис.11. Микроструктура взаимодействия пучка дейтронов с CH_2 -мишенью толщиной 1,6 мкм при энергии 1,3 ГэВ/пучлон на различных стадиях работы нуклотрона: (а) - начало цикла ускорения, (б) - выход на плато магнитного поля, (в) - циркуляция ускоренного пучка при выключенном ВЧ-поле (диссипация сгустков). Регистрируется световое излучение мишени.

мишени. В предположении, что геометрическое сечение пучка имеет форму канонического эллипса, по известному углу α между нитями 1, 3 и 2, а также по измеренному значению R_{bz} можно определить характерный вертикальный размер пучка

$$R_{bz} = R_{bx} \cdot ctg\alpha \sqrt{(L_2/2R_{bz})^2 - 1} . \quad (11)$$

В данном выражении величина L_2 равна пространственной ширине на полувысоте распределения 2 при скорости мишени, когда амплитуды и ширины сигналов 1 и 3 близки по величине. По измеренным ширинам пучка на полувысоте распределений в горизонтальной ($2R_{bz} \approx 4$ мм) и вертикальной $2R_{bz} \approx 6$ мм) плоскостях получены следующие оценки для поперечных эмиттансов циркулирующего пучка дейтронов на нуклотроне при энергии 1,6 ГэВ/нуклон: $\epsilon_x(\eta = 3) \approx 3$ мм·мрад, $\epsilon_z(\eta = 3) \approx 7$ мм·мрад.

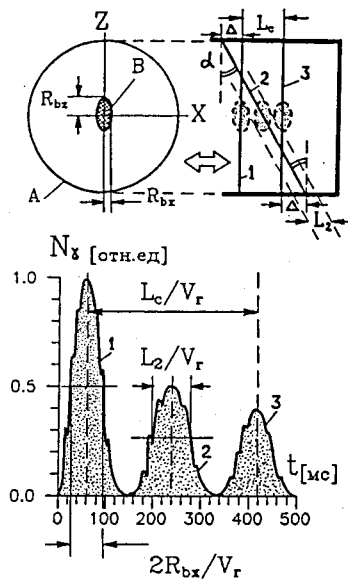


Рис.12. Схема горизонтального перемещения N-образной внутренней мишени из углеродных нитей ($\varnothing = 10$ мкм) и интенсивность их излучения (N_n) во времени.

Отмечена целесообразность использования подобных N-образных внутренних мишеней при настройке режимов работы ускорителя и оперативного контроля характеристик пучка во время сеанса.

В разделе 5.4 отмечено успешное проведение первых физических экспериментов с использованием внутренних мишеней на нуклотроне в диапазоне энергий дейтронов $100 \text{ А}\cdot\text{МэВ} \div 2,5 \text{ А}\cdot\text{ГэВ}$. При этом регистрировались γ -кванты, π - и подпороговые K-мезоны, а также различные ядерные фрагменты от протонов до изотопов ${}^6\text{He}$ и показана перспективность изучения переходных режимов от протон-нейтронного к кварк-глюонному состоянию ядерной материи на циркулирующих пучках ядер этого нового сверхпроводящего ускорителя. В качестве примера приведены новые результаты по кумулятивному рождению протонов в области фрагментации ядра углерода, полученные в рамках коллаборации СФЕРА при разных энергиях дейтронов и внутренней полиэтиленовой мишени. Рассмотрены возможности расширения проводимых исследований с циркулирующими пучками на область нейтронной физики. Проведены расчеты удельного выхода нейтронов (I_n/N_0) для различных внутренних мишеней и энергий ядер d и α на нуклотроне. Отмечено, что представленные на рис.13 результаты и достигну-

тые интенсивности циркулирующих дейтронов $\sim (1 \div 5) \cdot 10^9$ за цикл позволяют рассчитывать на получение недостающей в настоящее время экспериментальной информации по энергетическим и угловым распределениям, а также средней множественности нейтронов, рождающихся при внутриядерных каскадах и послекаскадной эволюции ядер мишени.

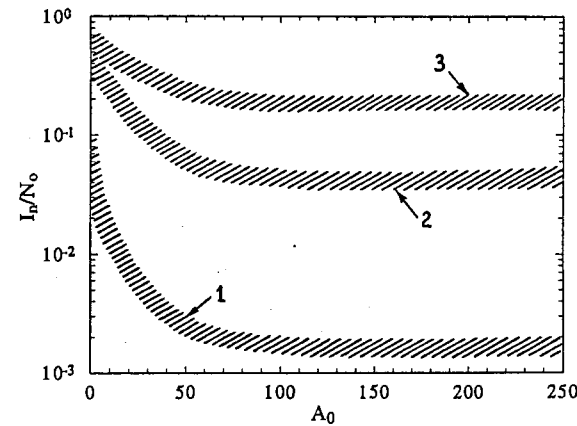


Рис.13. Зависимость удельного выхода нейтронов (I_n/N_0) за цикл работы нуклотрона ($T_c = 10$ с) от массового числа мишени (A_0) при её взаимодействии с циркулирующим пучком d - и α -частиц разных энергий (1 \rightarrow 100 А·МэВ, 2 \rightarrow 500 А·МэВ, 3 \rightarrow 1000 А·МэВ).

В заключении подведен краткий итог и проанализированы результаты проведенных исследований по взаимодействию ионов с внутренними мишенями на ускорителях, а также дана оценка предложенных и разработанных методов невозмущающей диагностики пучков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Проведенные в диссертации исследования охватывают широкий круг задач по технике физического эксперимента, связанных с взаимодействием ионов с внутренними корпускулярными и фотонными мишенями в линейных и циклических ускорителях. Рассмотрены некоторые аспекты этого взаимодействия в широком диапазоне энергий ионов от десятков килоэлектронвольт до релятивистских. Большое внимание уделено детальному теоретическому и экспериментальному изучению ряда элементарных процессов для целей оперативной и невозмущающей диагностики пучков отрицательных и некоторых молекулярных положительных ионов, а также нейтральных частиц. Важное место отведено разработке новых методов диагностики и устройств для их реализации, отдельным вопросам оптимального формирования и транспортировки

пучков, а также проведения физических экспериментов с использованием внутренних мишеней и пучков ядер в синхротронах на примере нуклотрона.

Научная новизна и практическая ценность представленных результатов исследований определяется прежде всего их связью с современными разработками по использованию сильноточных пучков ионов для высокоинтенсивных импульсных источников нейтронов, решения термоядерных проблем, электроядерного способа получения энергии и трансмутации радиоактивных отходов, передачи энергии на большие расстояния пучками частиц, а также использованием полученных результатов при оптимизации работы нового сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер - нуклотрона, планировании и проведении на нём физических экспериментов с использованием внутренних мишеней. Разработанная станция внутренних мишеней и многофункциональная система её управления на основе персонального компьютера предоставляет возможность проведения широкого класса экспериментов не только на нуклотроне, но и в будущем на его бустере.

Большинство научных результатов, представленных в диссертации, получено впервые. К ним относятся :

— экспериментально измеренные угловые распределения атомов водорода в элементарных актах обдирки ионов H^- разных энергий на корпускулярных мишенях;

— сечения обдирки σ_{-10} и σ_{01} на углероде для H^- и H^0 частиц с энергией 2 и 7 МэВ;

— близкое к трем отношение сечений возбуждения He , H_2 и N_2 быстрыми ионами H^- и протонами в диапазоне энергий 100 кэВ ÷ 2 МэВ;

— теоретически исследованные поляризационные эффекты в дифференциальных сечениях электронов в лабораторной системе отсчета при околопороговой обдирке ионов H^- лазерным излучением, а также при рождении электронов с параметрами угловой асимметрии $\beta_o = -1, 2$;

— расчеты сечений двухфотонной обдирки ионов H^- в области энергий фотонов превышающей однофотонный порог.

К новым результатам по технике физического эксперимента относятся:

— исследование фактора геометрии экспериментов при изучении рассеяния ионов на малые углы с использованием ленточных пучков;

— расчеты влияния тока пучка отрицательных ионов на точность его диагностики по электронам обдирки;

— проект и расчеты управляемого детектора пространственного рас-

пределения импульсного потока релятивистских электронов с разрешением 100÷150 мкм и высоким ресурсом работы в радиационных условиях сильноточных ускорителей;

— измерение пространственных характеристик циркулирующего пучка релятивистских дейтронов, оперативный контроль его структуры и светимости во времени с помощью светового излучения фольговых и нитевидных мишеней, используемых в физических экспериментах на нуклотроне;

— расчеты светимостей, времени жизни пучка ядер и интенсивности генерации быстрых нейтронов на нуклотроне при использовании внутренних мишеней.

Обнаружено световое излучение на выходе ненагруженного пучком ВЧ-резонаторов линейного ускорителя, изучена его природа и даны предложения по использованию в экспериментальной технике.

Результаты части проведенных исследований легли в основу разработок метода диагностики пучков отрицательных ионов по электронам фотообдирки, корреляционного метода невозмущающего определения параметров пучка ионов, а также метода диагностики пучков отрицательных и положительных ионов по электронам фотообдирки промежуточных быстрых нейтральных частиц. Новизна данных методов диагностики подтверждена тремя авторскими свидетельствами на изобретение. Предложены и разработаны новые типы компактных многофункциональных диагностических устройств, которые могут найти применение при проведении экспериментов на различных существующих и проектируемых ускорителях ионов. Некоторые из них применялись в Сухумском физико-техническом институте, а многофункциональное устройство с лазерным зондированием пучка ионов H^- высокой энергии разработано для линейного ускорителя МЕГАН Института ядерных исследований РАН (г. Троицк). Наибольшая эффективность этих устройств, а также преимущества предложенных методов невозмущающей диагностики пучков ожидаются при их использовании на разрабатываемых в различных центрах сильноточных ускорителях ионов H^- для прикладных задач.

Подведем краткий итог проведенных исследований.

1) В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований решено ряд методических задач по технике физического эксперимента, позволивших получить новую информацию о взаимодействии ионов с внутренними мишенями на ускорителях, а также осу-

шествовать оптимизацию и оперативный контроль этого взаимодействия при проведении экспериментов по ядерной физике на циркулирующем пучке нуклотрона. На основе регистрации продуктов взаимодействия ионов с различными зондирующими мишенями предложены и разработаны новые методы и многофункциональные устройства для невозмущающего контроля различных характеристик пучка с точностями, быстродействием и ресурсом работы в условиях существующих и проектируемых сильноточных ускорителей ионов, недоступных для традиционных методов диагностики.

2) В экспериментах по рассеянию ионов на малые углы ($10^{-5} \div 10^{-4}$ рад) впервые использованы ленточные пучки. Численным моделированием показано, что степень влияния данной геометрии эксперимента существенно зависит от функционального вида измеряемого углового дифференциального сечения в элементарном акте взаимодействия. При обработке полученного экспериментального материала по обдирке ионов H^- на различных газовых мишенях учтены результаты моделирования и показано, что максимальная точность соответствия угловых распределений ионов и атомов H^0 в пучке с энергией $E_{H^-} \geq 10$ кэВ определяется выражением G_o [рад] = $3 \cdot 10^{-2} / \sqrt{E_{H^-} [\text{кэВ}]}$. С учетом соотношения $\Delta E_o / E_{H^-} = (2 \div 2,5) \cdot G_o$ для ширины на полувысоте распределения атомов H^0 по энергии полученная зависимость $G_o(E_{H^-})$ может быть использована для задач диагностики пучков ионов H^- по атомам H^0 .

3) Теоретически изучено влияние поляризации и мощности фотонной мишени на обдирку быстрых ионов H^- вблизи однофотонного порога. Показано, что подбором мощности, пространственной ориентации импульса и поляризации фотонов можно реализовать условия передачи необходимой информации о пучке быстрым электронам или атомам водорода с максимальной точностью. Эти точности значительно выше достигаемых на корпускулярных мишенях.

4) Обоснована возможность экспериментального моделирования взаимодействия высокоэнергетических ионов H^- с фольговыми мишенями на пучках более доступных низких энергий, при том же безразмерном параметре взаимодействия и аналогичных токовых характеристиках. В экспериментах с углеродной фольгой при энергиях 2 и 7 МэВ измерены сечения обдирки ионов и ионизации атомов водорода.

5) Предложен и разработан метод невозмущающей диагностики пучка отрицательных ионов по электронам фотообдирки (ФЭДП) и исследованы его предельные возможности. С ориентацией на ионы H^- разработаны устройства для реализации метода в линейных ускорителях с энергией пучка от порядка десяти МэВ до релятивистской. Рассмотрено влияние поля пучка отрицательных ионов на достигаемую точность измерений. Показано, что предложенный метод ФЭДП может быть с успехом использован для релятивистских пучков ионов H^- с током в сотни миллиампер, например, в проектируемых источниках нейтронов на основе линейных ускорителей. Предложен проект и проведены расчеты детектора пространственного распределения импульсного потока быстрых электронов с разрешением $100 \div 150$ мкм для разработанных диагностических устройств и высоким ресурсом работы в радиационных условиях сильноточного пучка ионов.

6) Предложены и теоретически обоснованы метод диагностики пучка ионов по электронам фотоионизации промежуточных быстрых нейтральных частиц, рождающихся на зондирующей внутренней мишени в различных квантовых состояниях, и устройство для реализации метода на участке перезарядной инжекции или поворотах канала транспортировки ионов H^- высокой энергии.

7) Предложены метод и устройство для невозмущающей диагностики сильноточного пучка нейтральных частиц малой энергии (десятки \div сотни кэВ на нуклон) по электронам избирательной фотоионизации определенного квантового состояния.

8) Экспериментально изучено световое излучение газовых мишеней под воздействием ионов H^- . Показано, что в диапазоне энергий 100 кэВ \div 2 МэВ отношение сечений излучения He , H_2 и N_2 при взаимодействии с ионами H^- и протонами близко к трем. Разработано устройство и продемонстрированы его возможности при диагностике пучка ионов H^- с энергией 2 МэВ по световому излучению в канале транспортировки. Предложен профиллометр пучка с регистрацией светового излучения остаточного газа или пространственно локализованной газовой мишени.

9) Предложены и теоретически обоснованы корреляционный ме-

тод невозмущающей диагностики пучка ионов и устройство для его реализации в источниках H^- , других отрицательных и некоторых положительных молекулярных ионов.

10) Изучена природа светового излучения на выходе ненагруженных пучком ВЧ-резонаторов линейного ускорителя. Показана сильная зависимость интенсивности излучения от величины ВЧ-поля в них, материала вакуумной камеры за апертурой резонаторов и независимость этой интенсивности от вакуумных условий в широком диапазоне изменений давлений. Данное излучение генерируется электронами автоэмиссии на электродах, выходящими через апертуру резонатора, и может быть использовано для невозмущающего контроля ВЧ-мощности в нем в реальном масштабе времени, а также периодического тестирования стабильности параметров пучка.

11) Теоретически исследована эволюция параметров пучка ядер и проведен расчет светимостей при его взаимодействии с различными внутренними мишенями на нуклотроне.

12) Разработана и изготовлена станция внутренних мишеней, позволяющая проводить широкий класс экспериментов на циркулирующем пучке в области прикладной и релятивистской ядерной физики. Конструкция станции, метод контроля взаимодействия пучка с мишенью по её световому излучению, а также система управления на основе персонального компьютера IBM PC хорошо зарекомендовали себя в первых физических экспериментах на нуклотроне.

13) В физических экспериментах на циркулирующем пучке нуклотрона показано, что световое излучение фольговых и нитевидных мишеней может быть с успехом использовано для оперативного контроля относительной светимости во времени, высокочастотной структуры и пространственных характеристик пучка.

14) Проведен анализ перспективности экспериментов по генерации быстрых нейтронов с использованием внутренних мишеней и циркулирующих пучков ядер нуклотрона в диапазоне энергий $0,1 \div 1$ ГэВ/нуклон. Показано, что имеющиеся в настоящее время возможности нуклотрона, станции внутренних мишеней и различных детекторов нейтронов позволяют получить недостающую для ряда прикладных

задач экспериментальную информацию по энергетическим и угловым распределениям, а также средней множественности нейтронов, генерируемых при внутриядерных каскадах и послекаскадной эволюции ядер мишени.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- [1] Артемов А.С., Левкович Н.А. Численное изучение систематических ошибок в экспериментах с ленточными пучками // Препринт СФТИ-90-12, Москва: ЦНИИАтоминформ, 1990. - 16с.
- [2] Артемов А.С. Численное изучение влияния ленточной геометрии эксперимента на измерение угловых распределений частиц // Препринт ОИЯИ Р13-96-54, Дубна, 1996. - 15с.
- [3] Artiimov A.S. Experimental study of H^- ion detachment on thin gas targets // Preprint JINR E9-96-497, Dubna, 1996. - 14p.
- [4] Артемов А.С., Авидзба А.А., Вартазарян А.С. Предельные возможности диагностики пучка H^- ионов по электронам лазерной фотообдирки // Труды 13-го совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 13-15 октября 1992), Дубна Д9-92-455, 1993, Т.2, С.256-261.
- [5] Artiimov A.S., Avidzba A.A., Vartazarian A.S. The potentialities of H^- beam diagnostics by laser photodetachment electrons // Nucl. Instr. and Meth. A., 1993, V.328, No.3, P.408-412.
- [6] Артемов А.С., Авидзба А.А. Поляризаационные эффекты при однофотонной фотообдирке ионов H^- // Препринт СФТИ-90-17, Москва: ЦНИИАтоминформ, 1990. - 13с.
- [7] Артемов А.С., | Авидзба А.А. |, Вартазарян А.С. Влияние поляризации и мощности фотонной мишени на околопороговый развал быстрых ионов H^- // Препринт ОИЯИ Р9-96-146, Дубна, 1996. - 35с.
- [8] Артемов А.С., Байгачев Ю.К., | Геворков А.К. |, Сидорин А.О. Взаимодействие ионов H^- с фольговыми мишенями перезарядного устройства канала транспортировки пучка // Препринт ОИЯИ Р9-97-38, Дубна, 1997. - 10с.
- [9] Артемов А.С. Контроль параметров пучка отрицательных ионов и нейтральных частиц по электронам обдирки // Труды 14-го совещания по ускорителям заряженных частиц (Протвино, 25-27 октября 1994), 1995, Т.2, С.36-40.
- [10] Artiimov A.S. The potentialities of H^- beam diagnostics by detached

- particles // Preprint JINR E9-96-200, Dubna, 1996. - 6p.
Proc. of the 5-th Europ. Part. Accel. Conf. (Sitges/Barcelona, 10-14 June 1996), 1996, V.2, P.1654-1656.
- [11] Артемов А.С., Авидзба А.А. Предельные возможности диагностики пучка ионов по фотоэлектронам с параметром угловой асимметрии $\beta_o = -1$ // Сообщение ОИЯИ Р9-93-431, Дубна, 1993. - 12с.
- [12] Артемов А.С., Геворков А.К. Способ определения параметров пучка отрицательных ионов // Авт. свид. N 263428 (СССР, з.Н.3143559/3143560), МКИ H05H7/00, 1986. -6с.
- [13] Artiomov A.S., Vaganov N.G. et al. Method and apparatus for multifunctional nonperturbative diagnostics of H^- beams // IEEE Part. Accel. Conf. (San Francisco, California, 6-9 May 1991), 1991, V.3, P.1573-1575.
Production and Neutralization of Negative Ions and Beams: Sixth Intern. Symposium (Upton, New York, 1992), 1992, P.592-597.
- [14] Артемов А.С. Анализ влияния тока пучка отрицательных ионов на его диагностику по электронам обдирки // Сообщение ОИЯИ Р9-97-94, Дубна, 1997. - 6с.
- [15] Артемов А.С. Способ определения энергетического спектра пучка ионов // Авт. свид. N 1679878 (СССР), МКИ G01T1/29, 1990. -10с; Б.И., 1992, N.27, С.235.
- [16] Артемов А.С. Использование электронов фотоионизации $H(2s)$ атомов для измерения энергии пучка H^- ионов // Вопросы атомной науки и техники. Сер: Ядерно-физические исследования (теория и эксперимент), Харьков, 1991, N.3, С.23-26.
- [17] Artiomov A.S. New method of H^- beam diagnostics // Proc. of the 6-th Intern. Symp. on Production and Neutralization of Negative Ions and Beams (Upton, USA), 1992, P.579-585.
- [18] Artiomov A.S. A new method of ion beam diagnostics // Preprint JINR E9-92-501, Dubna, 1992. - 11p.
Proc. Bienn. Part. Accel. Conf. (Washington, 17-20 May 1993), Piscataway (N.Y.), 1993, V.3, P.2166-2168.
- [19] Артемов А.С. Радиационно стойкий детектор пространственного распределения импульсного потока быстрых электронов для диагностических устройств (предложение) // Сообщение ОИЯИ Р13-97-247, Дубна, 1997. - 19с.
- [20] Артемов А.С. Метод и устройство для невозмущающей диагностики пучка нейтральных частиц низкой энергии по электронам фотоионизации // Препринт ОИЯИ Р9-97-260, Дубна, 1997. - 7с.
- [21] Артемов А.С. Способ измерения энергетического распределения пучка отрицательных ионов // Авт. свид. N 298206 (СССР, з.Н.4501961), МКИ G01T1/36, 1988. -5с.
- [22] Artiomov A.S. Correlation method of nonperturbing measurements of ion beam energy spectra // IEEE Part. Accel. Conf. (San Francisco, California, 6-9 May 1991), 1991, V.3, P.1576-1578.
- [23] Artiomov A.S. Correlation method of measurements the negative (H^- , D^-) ion beam parameters // Production and Neutralization of Negative Ions and Beams: Sixth Intern. Symposium (Upton, New York, 1992), 1992, P.586-591.
- [24] Artiomov A.S. Correlation method of measurements of ion beam parameters // Preprint JINR E9-92-500, Dubna, 1992. - 6p.
Proc. Bienn. Part. Accel. Conf. (Washington, 17-20 May 1993), Piscataway (N.Y.), 1993, V.3, P.2169-2171.
- [25] Артемов А.С. Невозмущающая диагностика пучка ионов с использованием корреляционного анализа // Препринт ОИЯИ Р9-96-416, Дубна, 1996. - 22с.
- [26] Артемов А.С., Аринин Л.В. и др. Контроль пространственного положения пучка ионов H^- по световому излучению в канале транспортировки // Тезисы докладов 12-го Всесоюзного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц (Харьков, 28-30 мая 1991), Харьков, 1991, С.78.
- [27] Артемов А.С., Астрахарчик Г.Ф., Байгачев Ю.К., Геворков А.К. | Диагностика пучка ионов H^- по световому излучению в канале транспортировки // Препринт ОИЯИ Р9-97-276, Дубна, 1997. - 12с.
- [28] Артемов А.С., Аринин Л.В., Байгачев Ю.К., Геворков А.К. Особенности возбуждения He , H_2 и N_2 быстрыми H^- ионами // Письма в ЖЭТФ, 1991, Т.53, Вып.11, С.533-535.
- [29] Артемов А.С., Байгачев Ю.К. и др. Световое излучение на выходе ненагруженного пучком ВЧ-резонатора линейного ускорителя // Тезисы докладов 12-го Всесоюзного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц (Харьков, 28-30 мая 1991), Харьков, 1991, С.79.
- [30] Artiomov A.S., Sidorin A.O. Light radiation at the exit of RFQ and RF-field control // Preprint JINR E9-96-199, Dubna, 1996. - 4p.
Proc. of the 5-th Europ. Part. Accel. Conf. (Sitges/Barcelona,

- 10-14 June 1996), 1996, V.3, P.1890-1892.
- [31] Artiominov A.S. Using of internal targets in the Nuclotron // JINR Rapid Communications No.4[61]-93, Dubna, 1993, P.6-12. Acta Physica Polonica B., 1994, V.25, Nos.3/4, P.613-619.
- [32] Baldin A.M.,... Artiominov A.S. et al. The first experiments on nuclear reaction studies at Nuclotron // JINR Rapid Communications No.4[61]-93, Dubna, 1993, P.13-17;
- [33] Artiominov A.S. Parameter evolution of an ion beam interacting with the Nuclotron internal targets // Proc. of the Fourth Europ. Part. Accel. Conf. (London, 27 June - 1 July 1994), London, 1994, V.2, P.1391-1393.
- [34] Baldin A.M.,... Artyomov A.S. et al. An experimental run of the new superconducting accelerator Nuclotron at 3.8 and 6.2 GeV/c deuteron momentum // JINR Rapid Communications No.2[65]-94, Dubna, 1994, P.26-32. Nucl. Phys. A., 1995, V.583, P.637c-640c.
- [35] Artiominov A.S. The Nuclotron internal targets // JINR Rapid Communications No.4[67]-94, Dubna, 1994, P.40-49.
- [36] Артемов А.С. Эволюция параметров пучка при взаимодействии релятивистских ядер с внутренними мишенями на Нуклотроне // Труды 14-го совещания по ускорителям заряженных частиц (Протвино, 25-27 октября 1994), 1995, Т.3, С.190-192.
- [37] Артемов А.С., Афанасьев С.В. и др. Контроль взаимодействия пучка с внутренней мишенью на Нуклотроне по её световому излучению // Труды 14-го совещания по ускорителям заряженных частиц (Протвино, 25-27 октября 1994), 1995, Т.2, С.33-35.
- [38] Artiominov A.S. Peculiarities of the nucleus - internal target interaction at the Nuclotron // Nucl. Instr. and Meth. A., 1995, V.366, No.2/3, P.254-258.
- [39] Kliman J.,... Artiominov A.S. et al. PC-based control of the internal target station at the Nuclotron // 16-th Intern. Symp. on Nucl. Electronics and 6-th Intern. School on Autom. and Computing in Nucl. Phys. and Astrophysics (Varna, 12-18 September 1994), Dubna D13-94-491. 1995, P.202-207.
- [40] Артемов А.С., Дьяченко В.М., Коваленко А.Д. Потенциальные возможности генерации потока быстрых нейтронов на внутреннем пучке нуклотрона // Препринт ОИЯИ Р9-95-242. Дубна, 1995. - 10с.
Artiominov A.S., D'yachenko V.M., Kovalenko A.D. The potential-

- ties of fast neutron flux generation at a Nuclotron internal beam // Abstracts of the 1-st Intern. Symp. "BEAM TECHNOLOGIES" (Dubna, February 28 - March 4 1995), Section: Sources and accelerators of charged particle beams and plasma for application, P.40.
- [41] Артемов А.С., Анисимов Ю.С. и др. Станция внутренних мишеней на нуклотроне // Краткие сообщения ОИЯИ N.1[75]-96, Дубна, 1996, С.95-102.
- [42] Artiominov A., Kliman J. Status of the internal target technique at the Nuclotron // Proc. of the 5-th Europ. Part. Accel. Conf. (Sitges/Barcelona, 10-14 June 1996), 1996, V.3, P.2429-2431.
- [43] Анисимов Ю.С., Артемов А.С. и др. Система сбора данных и контроля в экспериментах на установке СФЕРА // Труды Международного совещания "Релятивистская ядерная физика - от сотен МэВ до ТэВ" (Созопол, 30 сентября - 5 октября 1996), Дубна Д1-97-6, 1997, Т.1, С.122-138.
- [44] Артемов А.С., Климан Я., Морхач М., Турзо И. Контроль пространственных характеристик пучка в физических экспериментах с внутренними мишенями на нуклотроне // Сообщение ОИЯИ Р9-97-126, Дубна, 1997. - 6с.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 ноября 1997 года.