

10; 12  
© 1992 г.ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕЯЩИХСЯ ИОННЫХ ПУЧКОВ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМС.Ф. Белых, Р.Н. Евтухов, Л.В. Луткова, Ю.Н. Лысенко,  
У.Х. Расулев, И.В. Редина

Предложен экспериментальный метод прямого измерения характеристик ионно-оптических систем (метод „светящихся ионных пучков“). Метод основан на визуализации траекторий пучков ионов, возбужденных в долгоживущие состояния с временами жизни  $\tau \geq 10^{-5}$  с, за счет их релаксации путем испускания фотонов в видимом диапазоне. Такие долгоживущие состояния были нами обнаружены для ионов ряда переходных и редкоземельных элементов. Демонстрируются возможности метода на примерах исследования простейших ионно-оптических систем.

## Введение

В настоящее время ионные пучки широко используются при решении многих научных, прикладных и технологических задач. Достаточно указать, что применение ионных пучков в значительной степени определило прогресс в понимании механизмов взаимодействия ускоренных ионов с поверхностью твердого тела [1], в развитии основанных на этих знаниях методов диагностики поверхности [2-4], в создании уникальных приборов микроэлектроники методами ионной технологии — имплантации, миксинга, профилирования, микрофрезерования, литографии [5].

Формирование ионных пучков с заданными параметрами и управление ими осуществляют с помощью разнообразных ионно-оптических систем (ИОС). Практика конструирования электровакуумных приборов, использующих потоки заряженных частиц, нуждается в знании характеристик ИОС, что стимулирует развитие теоретических и экспериментальных методов их исследования.

Обычно сведения о характеристиках ИОС (например, положение фокусов, главных плоскостей, кроссовера, фокусных расстояний, aberrаций и т. д.) извлекают, анализируя форму траекторий заряженных частиц в электрических и магнитных полях исследуемых систем [6, 7]. Существующие способы расчета траекторий приводят в параксиальном приближении к аналитическим решениям лишь для наиболее простых ИОС. В большинстве практически важных случаев требуется поиск оптимальных условий согласования светосилы и разрешающей способности ионной оптики, что достигается формированием пучков из частиц, обладающих большим разбросом по углам, энергиям и начальным координатам. В

этом случае точное определение траекторий из-за сложности математических вычислений затруднено, и здесь используют приближенные расчеты, графоаналитическое построение траекторий, численные расчеты на ЭВМ, что требует больших затрат времени. Следует отметить, что рассчитанные и реальные характеристики ИОС могут существенно различаться из-за краевых искажений полей, дефектов юстировки ИОС, микрошероховатости поверхности электродов, зарядки поверхности изоляторов, применяемых для крепежа электродов, влияния собственного пространственного заряда ионного пучка. Поэтому в каждом конкретном случае желательна проверка соответствия рассчитанных и реальных характеристик ИОС.

Для измерения реальных характеристик ИОС разработан ряд экспериментальных методик [6,7], среди которых наиболее экспрессными и точными являются „теневые“ методы с использованием электронного [7] и ионного [8] пучков. Однако эти методы [7,8] допускают лишь косвенное измерение характеристик и не позволяют в целом рассмотреть прохождение пучка через ИОС. Более того, по мере усложнения ИОС, например, при рассмотрении ионно-оптических элементов или их комбинаций, содержащих несимметричные либо изменяющиеся во времени конфигурации полей, эффективность методов [7,8], а следовательно, и точность определения с их помощью ионно-оптических характеристик уменьшаются. В связи с этим представляется актуальным развитие более информативных экспериментальных методов исследования характеристик ионной оптики, лишенных указанных недостатков.

В настоящей работе предложен новый прямой экспериментальный метод исследования характеристик ИОС (метод „светящихся ионных пучков“), в основе которого лежит использование пучков ионов, находящихся в долгоживущих возбужденных состояниях. Демонстрируются возможности метода, в том числе на примере исследования ионно-оптических характеристик известной конструкции одиночной электростатической линзы. Оценивается точность метода путем сравнения рассчитанных и измеренных характеристик, обсуждаются область применения метода и пути повышения его информативности.

### Метод „светящихся ионных пучков“

Суть предлагаемого метода исследования характеристик ионной оптики проста: пучок возбужденных ионов, распространяясь в исследуемой ионно-оптической системе, испускает фотоны в видимом диапазоне спектра и тем самым визуализирует свою траекторию. Рассмотрим условия, необходимые для создания светящегося ионного пучка. Интенсивность фотонов  $dI$  с длиной волны  $\lambda_1$ , испускаемых элементом объема пучка  $dv = sdx$ , расположенного на расстоянии  $x$  от источника возбужденных ионов, дается выражением

$$dI = - \frac{A_1}{v_0} I_0 \exp \left( - \sum_{i=1}^n A_i \frac{x}{v_0} \right) s dx, \quad (1)$$

где  $A_1$  — вероятность перехода с испусканием фотона с длиной волны  $\lambda_1$ ;  $I_0$  — интенсивность фотонов, высвечиваемых в области источника ( $x=0$ );  $v_0$  — скорость ионов;  $s$  — поперечное сечение пучка.

определим условие сохранения "светимости" пучка на расстоянии  $x \cong x_0$  ( $x_0$  — характерные размеры экспериментального прибора) в виде

$$\sum_{i=1}^n A_i \frac{x}{v_0} \cong 1. \quad (2)$$

Тогда для используемых на практике значений  $v_0 \cong 3 \cdot 10^6$  см/с и  $x_0 \cong 100$  см условию (2) удовлетворяют времена жизни возбужденных состояний ионов  $\tau$  ( $\tau = 1 / \sum_{i=1}^n A_i \cong 3 \cdot 10^{-5}$  с. Таким образом, светящиеся пучки необходимо формировать из ионов, эффективно возбуждаемых в долгоживущие возбужденные состояния ( $\tau \geq 10^{-5}$  с), релаксация которых сопровождается испусканием фотонов в видимом диапазоне.

Известно [9], что основные закономерности спектров испускания ионов легких элементов соответствуют схеме LS-связи (L и S — соответственно орбитальный и спиновый моменты иона) и следующим из нее правилам отбора по  $\Delta L$  и  $\Delta S$ . Согласно этим правилам, низколежащие возбужденные состояния разделяются на резонансные ( $\tau \cong 10^{-8}$  с) и метастабильные ( $\tau \geq 10^{-3}$  с). Такие значения  $\tau$  не удовлетворяют условию (2). Действительно, резонансно-возбужденные ионы практически полностью „высветят“ на расстоянии  $x \cong 0.1$  см (см. формулу (1)), а испускание фотонов метастабильными ионами, являясь маловероятным событием, недостаточно для визуализации пучка.

Известно также, что, согласно теоретическим представлениям [9], для ионов тяжелых элементов следует ожидать существенного уменьшения времени  $\tau$  метастабильных состояний из-за возрастания вклада спин-орбитального взаимодействия. Однако анализ справочной литературы [10, 11] показал отсутствие каких-либо данных о значениях  $\tau$  в интервале  $10^{-8} \ll \tau \ll 10^{-3}$  с для возбужденных состояний ионов тяжелых элементов.

Недавно [12] нами наблюдались интенсивные линии ионов ряда переходных и редкоземельных элементов (Sc, Gd, Dy, Ho, Yb), возникающие при радиационном распаде долгоживущих возбужденных состояний. Возможность формирования из таких частиц протяженных светящихся пучков представляет значительный интерес. Действительно, в [12] было обнаружено следующее.

1) Пучки долгоживущих возбужденных ионов испускают достаточно интенсивное свечение, которое при токе ионов  $i \sim (2-3) \cdot 10^{-6}$  А можно без адаптации зрения наблюдать визуально или регистрировать иным способом.

2) Свечение испускается пучком изотропно и визуализирует траектории его частиц.

3) Светимость пучка не зависит от давления остаточных газов в пределах  $3 \cdot 10^{-8} < P < 5 \cdot 10^{-5}$  Тор. Это свидетельствует о том, что наблюдаемое свечение не определяется процессами взаимодействия ионов пучка с молекулами остаточного газа.

4) Спектр свечения линейчатый и располагается в видимой области. На рис. 1 в качестве примера приведен спектр свечения пучка возбуж-

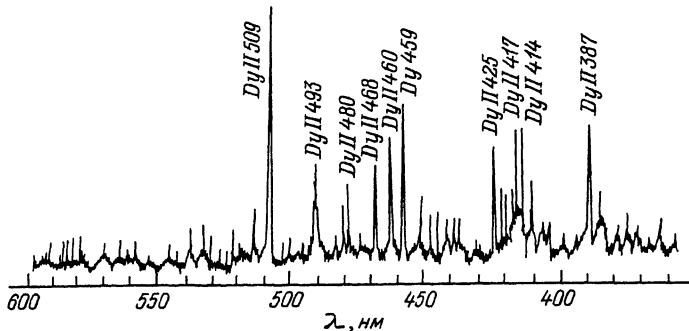


Рис. 1. Спектр свечения пучка возбужденных ионов диспрозия. Регистрация излучения осуществлялась из области, расположенной на расстоянии 0.4 м от источника ионов. Энергия ионов  $E_0 = 3$  кэВ; ионный ток  $i = 2 \cdot 10^{-6}$  А.

денных ионов диспрозия. Регистрация излучения проводилась из области, расположенной на расстоянии 0.4 м от источника ионов.

5) Интенсивность свечения слабо убывает с расстоянием. Протяженность светящегося пучка достигает величины  $x \approx 1$  м, что при использованном значении  $E_0 = 3$  кэВ соответствует времени жизни возбужденных состояний  $\tau > 10^{-5}$  с.

Приведенные значения параметров светящихся пучков свидетельствуют о широких возможностях их практического использования. Так, в [13] показано, что протяженные светящиеся пучки позволяют визуализировать в целом траектории частиц в электрических и магнитных полях.

### Экспериментальная установка и условия опытов

Метод „светящихся ионных пучков“ реализован на установке (рис. 2), состоящей из вакуумной камеры, источника ионов и откачной системы. Возбужденные ионы образовывались в специальном источнике [14] в процессах столкновений атомов переходных либо редкоземельных элементов с быстрыми электронами (энергия и ток электронов соответственно 0.6 кэВ и 0.1 А), ускорялись до энергии  $E = 3$  кэВ и при помощи электростатических линз собирались в параллельный пучок. Вариацией потенциалов, прикладываемых к электродам линз, и использованием сменных диафрагм достигалось изменение диаметра поперечного сечения пучка  $d$  в пределах  $d = 1.5-20$  мм. Полный ток ионов в основном и возбужденных состояниях при необходимости измерялся цилиндром Фарадея и составлял величину  $i = 1-20 \cdot 10^{-6}$  А. Стабильность ионного тока была не хуже  $\sim 0.1\%$ . Светящийся пучок ионов направлялся в камеру, где располагались отклоняющая система из двух последовательно установленных плоских конденсаторов и исследуемая ионная оптика. Приложением соответствующих потенциалов к обкладкам конденсаторов при необходимости производилось параллельное смещение ионного пучка относительно направления его первоначального распространения. Наблюдение траекторий пучков осуществлялось через смотровые окна, расположенные на расстояниях  $\sim 0.4$  и  $\sim 1$  м от источника ионов. Иссле-

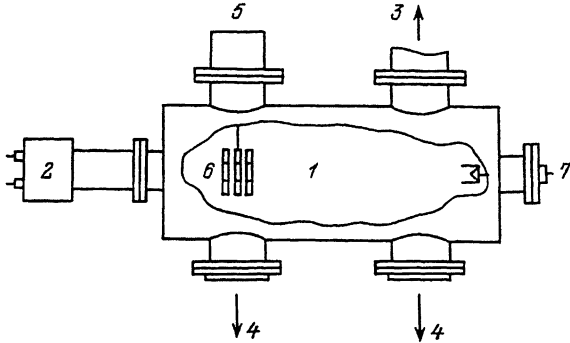


Рис. 2. Схема установки для реализации метода „светящихся ионных пучков“.

1 — вакуумная камера; 2 — источник ионов, 3 — откачная система, 4 — окна для наблюдения, 5 — манипулятор, 6 — исследуемая ионно-оптическая система, 7 — цилиндр Фарадея.

двуемые ИОС крепились на манипуляторе „x-y-z-φ“. Это обеспечивало перемещение и юстировку ИОС относительно пучка ионов в процессе подготовки установки к измерениям без ее разгерметизации. Откачка вакуумной камеры производилась сорбционными и магниторазрядными насосами. В рабочих условиях давление остаточных газов  $P$  не превышало значения  $P \leq 3 \cdot 10^{-8}$  Торр. Регистрация траекторий светящегося пучка проводилась фотографическим способом. При токе ионов  $i = 2 \cdot 10^{-6}$  А время экспозиции фотопленки чувствительностью 250 ед. ГОСТа составляло 10–15 мин. Все приведенные ниже количественные данные получены путем усреднения результатов, извлеченных из 3–5 фотографий.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 3 в качестве примера, иллюстрирующего возможности предлагаемого метода, приведены фотографии траекторий светящихся пучков в простейших электростатических полях, создаваемых  $270^\circ$ -ным цилиндрическим конденсатором; системой из двух плоских конденсаторов и отражающей плоскостью. Каждая из фотографий сопровождается схемой хода ионных пучков в ИОС. Как видно, использование светящихся пучков позволяет визуализировать прохождение ионов не только в бесполом пространстве, но и наблюдать характерные особенности траекторий в пространстве действия ИОС. Так, параллельный пучок ионов в цилиндрическом конденсаторе (рис. 3, а) дважды фокусируется при значениях угла  $\varphi$ , равных соответственно  $\approx 63^\circ$  и  $\approx 190^\circ$ . Система из двух плоских конденсаторов (рис. 3, б) при приложении к их пластинам определенных потенциалов допускает параллельное смещение пучка относительно направления его первоначального распространения. Движение расходящихся пучков ионов в поле положительно заряженной плоскости (плоское зеркало) (рис. 3, в) происходит по параболическим траекториям.

Таким образом, данные рис. 3 свидетельствуют, что с помощью светящихся пучков можно непосредственно определять форму траекторий

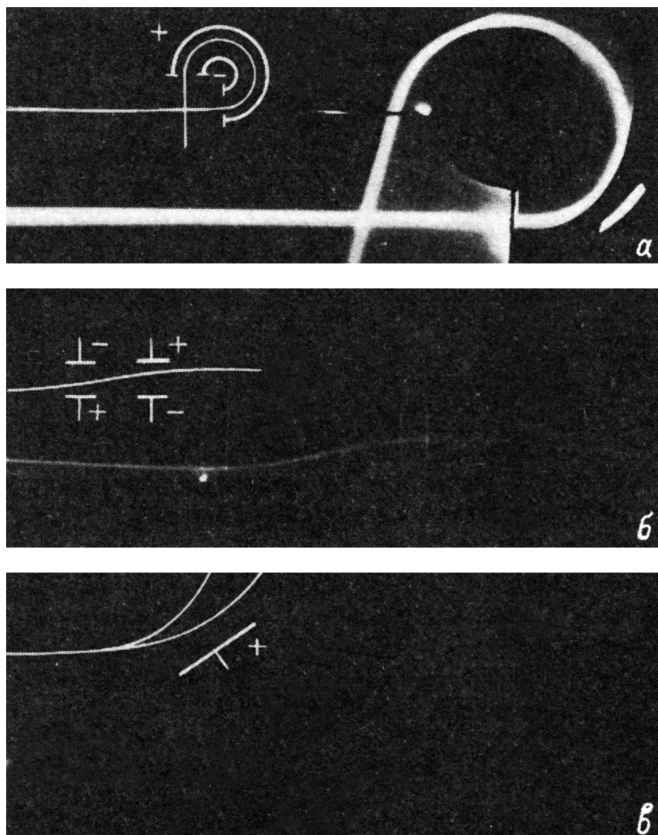
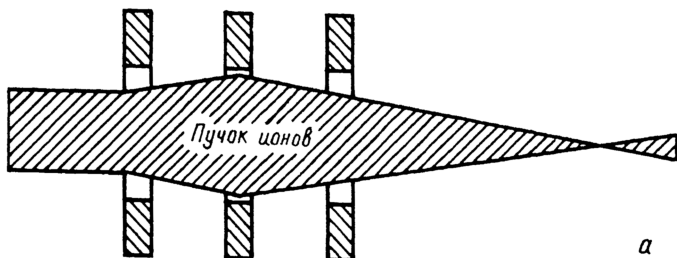


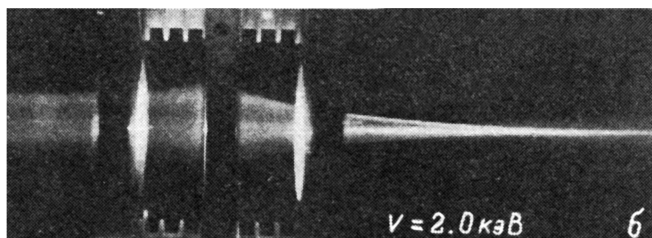
Рис. 3. Прохождение светящихся ионных пучков в электрических полях  $270^\circ$ -ного цилиндрического конденсатора (а), системы из двух плоских конденсаторов (б), отражающей плоскости (в).

ионов в полях различных ИОС, т.е. решать прямую задачу ионной оптики. Важно отметить, что указанные пучки также допускают решение обратной задачи — исследование оптических характеристик ИОС. Реализация этих исследований впервые осуществлена в [15], где эффективность предлагаемого метода была продемонстрирована на примере измерения положения фокуса одиночной электростатической линзы произвольной конструкции.

Рассмотрим прохождение светящегося пучка через одиночную электростатическую осесимметричную линзу — одного из наиболее распространенных типов линз, используемых для фокусировки ионов без изменения их энергии в различных ионно-оптических приборах. В этом случае представляли интерес определение зависимости оптических характеристик линзы от потенциала  $V$ , прикладываемого к ее среднему электроду, и сравнение этих характеристик с расчетными данными. Поэтому объектом исследования специально была выбрана линза известной конструкции, параметры которой рассчитаны в работе [16]. Схема хода ионных лучей в линзе и ее геометрические размеры приведены на рис. 4, а. Первоначально поток ионов перед входом в линзу формировался в виде

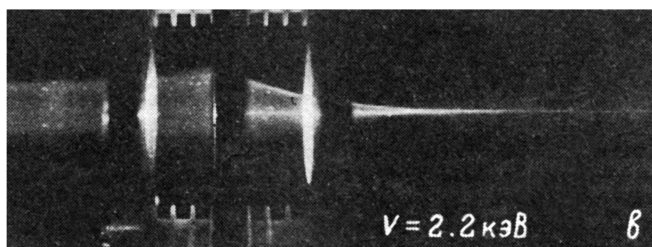


а



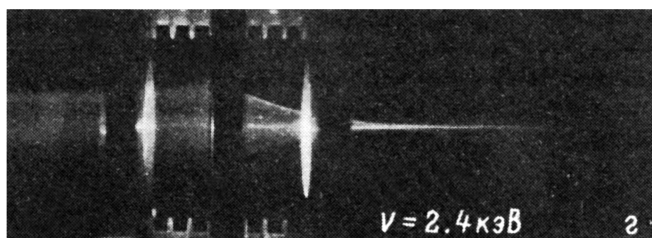
$V = 2.0 \text{ кэВ}$

б



$V = 2.2 \text{ кэВ}$

в

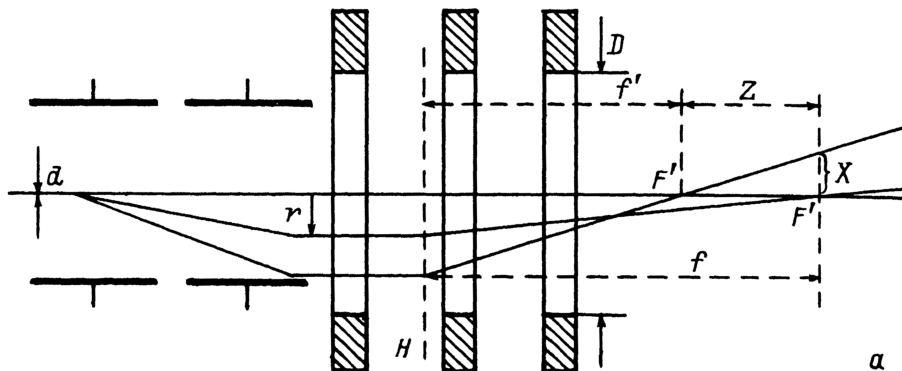


$V = 2.4 \text{ кэВ}$

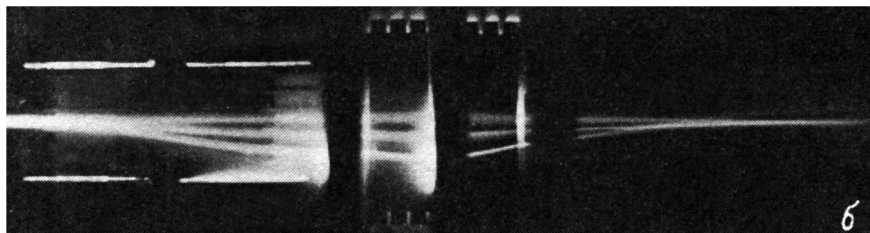
г

Рис. 4. Прохождение светящегося пучка через одиночную осесимметричную электростатическую линзу при различных значениях потенциала  $V$ .  $E = 3 \text{ кэВ}$ ;  $i = 8 \cdot 10^{-6} \text{ А}$ ,  $d = 18 \text{ мм}$ ,  $D = 24 \text{ мм}$ ; а — схема; б-г — фотографии.

симметричного относительно ее главной оптической оси параллельного пучка с диаметром поперечного сечения  $d = 18 \text{ мм}$ . Это обеспечивало наблюдение интегральной картины прохождения через линзу параксиальных и непараксиальных ионных лучей. Такие результаты для ряда значений положительного потенциала  $V$  (тормозящий режим работы линзы) представлены на рис. 4, б-г. Здесь наглядно видны особенности прохождения пучка в пространстве действия линзы и за ее пределами, искажения, вносимые непараксиальной частью пучка за счет сферической aberrации, динамика изменения положения кроссовера при вариации потенциала  $V$ .



a



б

Рис. 5. Прохождение зондовых светящихся пучков через одиночную электростатическую линзу.

$E_0 = 3$  кэВ,  $V = 2.11$  кВ,  $i = 2 \cdot 10^{-6}$  А,  $d = 1-1.5$  мм,  $D = 24$  мм; а

— схема, б — фотография.

Кроме того, на фотографиях наблюдается определенный контраст свечения, испускаемого ионами параксиальных и непараксиальных лучей, обусловленный экспоненциальным законом спонтанного испускания фотонов возбужденными частицами (см. формулу (1)). Действительно, по сравнению с ионами параксиальных траекторий, ионы непараксиальных траекторий проходят пространство действия линзы за большее время и здесь их свечение более интенсивно. Напротив, в бесполовом пространстве за линзой большей интенсивностью свечения обладают ионы параксиальных траекторий. В этой области контраст свечения дополнительно усиливается и за счет сферической аберрации, поэтому фокусировка параксиальных лучей наблюдается на слабом фоне свечения расходящихся непараксиальных лучей. Указанные факторы позволяют выделить вклад, вносимый в формирование изображения параксиальными лучами, и тем самым определить для них положение фокуса.

Однако, как показали дальнейшие исследования, значительно большей точности в измерении характеристик ИОС можно достичь, если использовать светящиеся пучки-зонды малого диаметра  $d$  поперечного сечения ( $d \ll D$ , где  $D$  — диаметр входной апертуры).

Схема прохождения зондовых пучков через одиночную электростатическую линзу приведена на рис. 5, а. В этом случае зондовые пучки, распространяющиеся параллельно главной оптической оси, после прохождения линзы имеют пересекающиеся траектории, по которым определяют такие кардинальные элементы, как положение фокуса  $F$ , положение



главной плоскости  $H$ , фокусное расстояние  $f$ . Варьируя смещение пучка  $g$  от оптической оси, можно измерить кардинальные элементы как для параксиальных ( $g \geq 0$ ), так и для непараксиальных ( $g \leq D/2$ ) ионных лучей. Это позволяет непосредственно определить абберационные характеристики линзы — продольную сферическую  $Z$  и поперечную сферическую  $X$ .

Здесь важно, что использование зондовых пучков обеспечивает высокую точность ( $\approx d$ ) определения местоположения точек пересечения их траекторий. Кроме того, по сравнению с предыдущим случаем увеличивается чувствительность регистрации, поскольку плотность излучения фотонов возбужденными ионами из элемента объема пучка возрастает в  $\approx (D/d)^2$  раз.

На рис. 5, 6 в качестве примера представлена фотография наблюдаемого прохождения светящихся пучков-зондов через линзу при подаче на ее средний электрод положительного потенциала  $V = 2.11$  кВ. Аналогичные фотографии были получены и для других значений  $V$ . Из этих данных были определены зависимости характеристик  $F$ ,  $f$ ,  $H$ ,  $Z$ ,  $X$  от  $V$ . Так, для случая, показанного на рис. 3, а, эти величины, измеренные относительно главной плоскости, были равны  $f = 71.2 \pm 2$  мм;  $f' = 47.0 \pm 1.5$  мм;  $Z = 24 \pm 1$  мм;  $X = 3.8 \pm 0.2$  мм. Сравнение измеренных характеристик с данными расчета по методике работы [16] показало, что они согласуются с точностью не хуже 6—10%. Таким образом, использование светящихся пучков-зондов позволяет с хорошей точностью измерять кардинальные элементы и абберационных характеристики ИОС, а также их зависимость от величин  $g$  и  $V$ .

### Заключение

Оценка погрешности приведенных измерений не превышала 2—4% и имеет тот же порядок величины, что и погрешность измерения теньвым методом [5]. Точность измерений можно повысить, если область пересечения пучков-зондов фотографировать с большим увеличением, а негативное изображение этой области микрофотометрировать с введением денситометрической поправки.

Важно подчеркнуть, что характеристики ИОС, измеренные при помощи светящегося пучка, автоматически самосогласованы по отношению к его собственному пространственному заряду. Поэтому воздействие этого фактора на характеристики ионной оптики можно легко наблюдать, изменяя плотность ионного тока.

Предлагаемая методика позволяет исследовать как простые, так и сложные ИОС, создающие несимметричные электрические и магнитные поля. Действительно, для анализа трехмерных траекторий частиц в несимметричных полях достаточно регистрировать свечение пучка в нескольких проекциях. Как показали наши исследования, светимость ионного пучка вполне достаточна для измерения характеристик ИОС, создающих изменяющиеся во времени электрические и магнитные поля. Экспрессность метода можно повысить, если изображение траекторий пучка отобразить в электрические сигналы, обработать их с помощью ЭВМ, а полученную информацию вывести на дисплей компьютера.

Таким образом, при помощи светящихся пучков ионов можно проводить экспрессные прямые измерения характеристик различных ИОС, исследовать влияние на эти характеристики пространственного заряда пучка, проводить настройку и юстировку электровакуумных приборов,

проверяя правильность расчетов ионной оптики, проводите наглядные лабораторные студенческие работы по курсу „Электронная и ионная оптика“.

Авторы признательны В.Х. Ферлегеру за полезное обсуждение работы.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бериша. М.: Мир. 1984. 336 с.
- [2] Методы анализа поверхностей / Под ред. А. Зандерны. М.: Мир, 1979. 584 с.
- [3] Черепин В.Т. Ионный зонд. Киев: Наукова думка, 1981. 328 с.
- [4] Поп С.С., Белых С.Ф., Дробнич В.Г., Ферлегер В.Х. Ионно-фотонная эмиссия металлов. Ташкент: ФАН, 1989. 200 с.
- [5] Аброян И.А., Андронов А.Н., Титов А.И. Физические основы электронной и ионной технологии. М.: Высшая школа, 1984. 319 с.
- [6] Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика. Л.: Наука, 1968. 488 с.
- [7] Баранова Л.А., Явор С.Я. Электростатические электронные линзы. М.: Наука, 1986. 192 с.
- [8] Stoffeles J.J., Ellis D.R. // Int. J. Mass. Spectrom. and Ion Process. 1989. Vol. 38. N 2-3. P. 277-282.
- [9] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Т. 3. М.: Физматгиз, 1963. 704 с.
- [10] Радциг А.А., Смирнов Б.Б. Параметры атомов и атомных ионов. М.: Энергоиздат, 1986. 344 с.
- [11] Пенкин Н.П., Горшков В.Н., Комаровский В.А. // ЖПС. 1984. Т. 61. Вып. 4. С. 533-548.
- [12] Белых С.Ф., Евтухов Р.Н., Редина И.В., Ферлегер В.Х. // Тез. докл. X Всесоюз. конф. ФЭАС. Ужгород, 1988. С. 40.
- [13] Белых С.Ф., Евтухов Р.Н., Редина И.В. // Тез. докл. Всесоюз. симпозиума по взаимодействию атомных частиц. Ташкент, 1989. С. 105-106.
- [14] Belykh S.F., Evtukhov R.N., Rasulev U.Kh., Redina I.V. // Proc. of 7<sup>th</sup> Int. Conf. IBMM-91. NIM. 1991. Vol. 59/60. P. 106-109.
- [15] Белых С.Ф., Евтухов Р.Н., Расулев У.Х., Редина И.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 24. С. 72-76.
- [16] Shimizu K., Kawakatsu H. // J. Phys. E. 1974. Vol. 7. P. 472-476.

Институт электроники им. У.А. Арифова  
Ташкент

Поступило в Редакцию  
5 июня 1991 г.