

- [5] Миногоин В.Г., Рождественский Ю.В. // ЖЭТФ. 1985. Т. 88. С. 1950.
- [6] Kaivola M., Thorsen P., Poulsen O. // Phys. Rev. 1985. A32. P. 207.
- [7] Миногоин В.Г. и др. // Опт. и спектр. 1990. Т. 68. С. 63.

Ленинградский  
политехнический  
институт  
им. М.И. Калинина

Поступило в Редакцию  
6 сентября 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 24

26 декабря 1989 г.

10; 12

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПУЧКОВ ВОЗБУЖДЕННЫХ ИОНОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.Ф. Б е л ы х, Р.Н. Е в т у х о в,  
У.Х. Р а с у л е в, И.В. Р е д и н а

При конструировании электровакуумных приборов необходимо знать характеристики ионно-оптических систем, используемых для сбора, фокусировки, формирования, отклонения, транспортировки, энерго- и массанализа потоков заряженных частиц. Сведения о таких характеристиках получают, анализируя форму траекторий частиц в электрических и магнитных полях исследуемых систем. Эта задача обычно решается расчетными либо графоаналитическими методами [1, 2]. Существующие способы расчета траекторий приводят к аналитическим решениям лишь для простейших систем. При решении большинства практических задач используют приближенные расчеты, численные расчеты на ЭВМ, а также экспериментальное исследование характеристик ионно-оптических систем, например, с помощью электронно-оптической скамьи [1]. К сожалению, эти методы малоэффективны при исследовании систем, содержащих несимметричные поля, и в тех случаях, где важен учет пространственного заряда пучка. Именно поэтому представляется актуальным развитие новых экспериментальных методов исследования характеристик ионной оптики, лишенных указанных недостатков.

В настоящем сообщении предложена оригинальная методика прямого измерения характеристик ионно-оптических систем, основанная на результатах изучения свойств светящихся пучков возбужденных ионов. Эффективность этой методики продемонстрирована на примере измерения положения фокуса одиночной электростатической линзы.

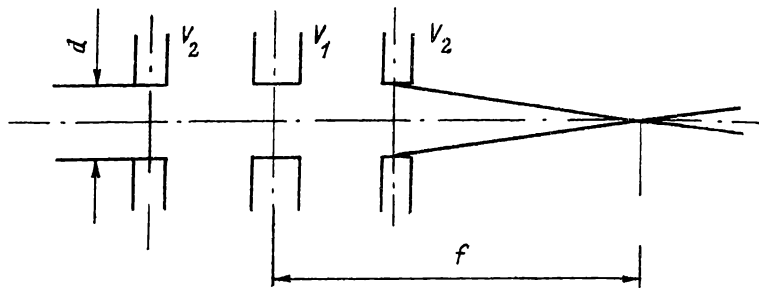
Ранее [3] нами наблюдались весьма интенсивные спектральные линии ионов ряда переходных и редкоземельных элементов, соответствующие достаточно долгоживущим возбужденным состояниям, сведения о которых отсутствуют в справочной литературе (см., например, [4, 5]). Сам факт существования долгоживущих состояний возбужденных ионов, а также возможность формирования из таких частиц протяженных светящихся пучков представляют значительный интерес.

Возбужденные ионы образовывались в процессах столкновений атомов с быстрыми электронами, затем ускорялись до энергии  $E_0$  и формировались в пучок. Полный ток ионов в основном и возбужденных состояниях составлял  $i = (1-20) \cdot 10^{-6}$  А. Светящийся пучок направлялся в камеру, предназначенную для размещения исследуемых ионно-оптических систем и снабженную окнами для наблюдения, которые располагались на расстояниях, равных  $\sim 0.4$  м и  $\sim 1$  м от источника ионов. Давление остаточных газов в камере  $P \approx (3-10) \cdot 10^{-8}$  Тор. Регистрация свечения проводилась как фотографическим, так и фотоэлектронным способом, в том числе и с применением спектральной техники.

Было обнаружено, что: а) пучки долгоживущих возбужденных ионов испускают достаточно интенсивное свечение, которое при токе ионов  $i \approx (2-3) \cdot 10^{-6}$  А можно наблюдать визуально или регистрировать иным способом; б) свечение пучком испускается изотропно и визуализирует траектории его частиц; в) светимость пучка не зависит от давления в пределах  $3 \cdot 10^{-8} \leq P \leq 5 \cdot 10^{-5}$  Тор; г) спектр свечения - линейчатый и располагается в видимой области; д) интенсивность свечения слабо убывает с расстоянием. Протяженность светящегося пучка достигает величины  $x \approx 1$  м, что при использованных значениях  $E_0$  и  $x$  соответствует времени жизни возбужденных состояний  $\tau \approx 10^{-5}$  с.

Приведенные значения параметров светящихся пучков свидетельствуют о широких возможностях их практического использования. Действительно, имеется протяженный интенсивно светящийся пучок ионов, формой которого можно управлять путем изменения напряженностей электрических и магнитных полей.

Для демонстрации возможностей предлагаемой методики приведены результаты измерения положения фокуса  $f$  одиночной электростатической линзы при различных значениях потенциала  $V_f$ , прикладываемого к ее среднему электроду. Положение фокуса отсчитывалось от плоскости, проходящей через центр среднего электрода. С целью упрощения измерений поток ионов перед входом в линзу формировался в виде параллельного пучка с диаметром сечения, равным диаметру входного отверстия линзы  $d$ , симметричного относительно главной оптической оси системы. Это обеспечивало кроссовер пучка в фокальной плоскости системы и возможность непосредственного измерения величины  $f$ . Прохождение параллельного пучка через одиночную линзу схематично изображено на рис. 1, а. На рис. 1 также приведены фотографии наблюдаемого прохождения светящихся пучков через линзу при подаче на ее средний электр-



*a*

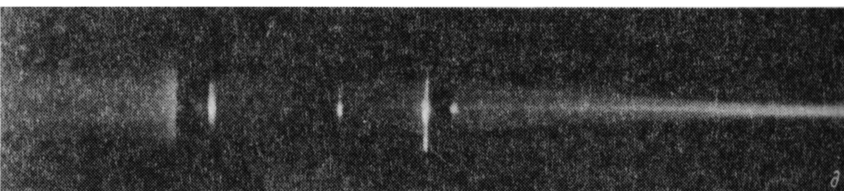
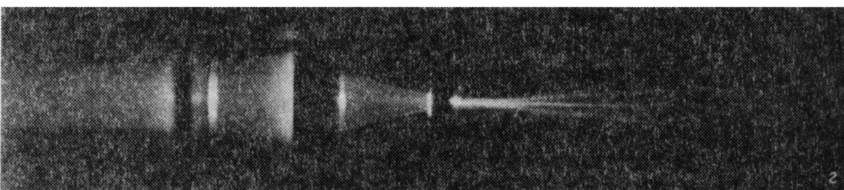
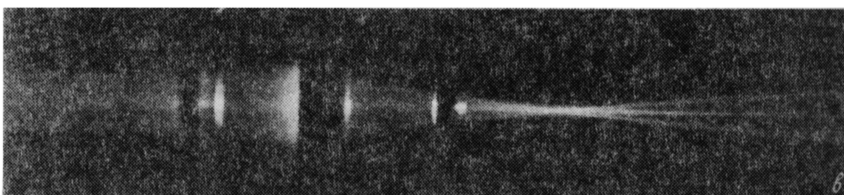
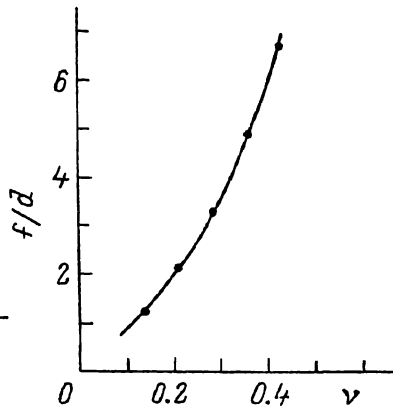


Рис. 2. Зависимость положения фокуса тормозящей линзы (в единицах  $f/d$ ) от отношения потенциалов  $\nu = V_1/V_2$



трод тормозящего положительного (б-г) и ускоряющего отрицательного (д) потенциалов  $V_1$ . Здесь наглядно видны особенности прохождения ионного пучка в пространстве действия линзы и динамика формирования кроссовера при вариации  $V_1$ . Из этих данных путем непосредственных измерений была получена одна из основных характеристик линзы - зависимость положения ее фокуса (в единицах  $f/d$ ) от отношения потенциалов  $\nu = V_1/V_2$  (рис. 2<sup>1</sup>), где

$V_2$  - потенциал наружных электродов, соответствующий кинетической энергии ионов, которую они имеют перед входом в линзу. Погрешность этих измерений не превышала 2-4% и имеет тот же порядок величины, что и погрешность измерения теневым методом [6]. Точность измерений можно повысить, если область кроссовера фотографировать с большим увеличением, а негативное изображение этой области микрофотометрировать с введением денситометрической поправки. В рамках предлагаемой методики легко найти и другие характеристики, например зависимости коэффициентов сферической и хроматической aberrации от положения фокуса линзы.

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

Предлагаемая методика позволяет исследовать как простые, так и сложные системы, создающие несимметричные электрические и магнитные поля. Действительно, для анализа трехмерных траекторий частиц в несимметричных полях достаточно регистрировать свечение пучка в нескольких проекциях.

<sup>1</sup>Приведенная на рис. 2 зависимость соответствует условиям, когда к среднему электроду линзы прикладывались тормозящие положительные потенциалы  $V_1$ . В этом случае величина  $\nu < 1$ .

Рис. 1. а - схематическое изображение прохождения параллельного пучка ионов через одиночную электростатическую линзу; б-д - наблюдаемое прохождение светящихся пучков ионов через линзу при различных значениях  $f = V_1/V_2$  б - 0.45; в - 0.3; г - 0.2; д - 2.4.

Таким образом, с применением светящихся пучков ионов можно осуществлять прямые измерения характеристик разнообразных ионно-оптических систем, изучать влияние на эти характеристики пространственного заряда пучка, а также проверять правильность машинных расчетов ионной оптики.

Авторы благодарят В.Х. Ферлегера за интерес к работе и полезные обсуждения, Ю.Н. Лысенко и Л.В. Луткову за помощь в проведении экспериментов.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] К е л ь м а н В.М., Я в о р С.Я. Электронная оптика. М.: Наука. 1968. 487 с.
- [2] С т р а ш к е в и ч А.М. Электронная оптика электростатических систем. М.: Энергия. 1966. 328 с.
- [3] Б е л ы х С.Ф., Е в т у х о в Р.Н., Р е д и н а И.В., Ф е р л е г е р В.Х. // Тез. докл. на X Всес. конф. по физике электронных и атомных столкновений. Ужгород: УЖО ИЯИ АН УССР. 1988. Ч. 1. С. 40.
- [4] Р а д ц и г А.А., С м и р н о в Б.М. Параметры атомов и атомных ионов. Справочник. М.: Энергоатомиздат. 1986. 344 с.
- [5] П е н к и н Н.П., Г о р ш к о в В.Н., К о м а р о в - с к и й В.А. // ЖПС. 1984. Т. ХЫ1. В. 4. С. 533-548.
- [6] Б а р а н о в а Л.А., Б у б л я е в Р.А., Я в о р С.Я. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 3. С. 430-433.

Институт электроники  
им. У.А. Арифова  
АН УзССР, Ташкент

Поступило в Редакцию  
14 марта 1989 г.  
В окончательной редакции  
23 августа 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 24

26 декабря 1989 г.

10

### ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ

В.В. Р ы ж о в, А.А. С а п о ж н и к о в,  
И.Ю. Т у р ч а н о в с к и й

Исследования взаимодействия сильнофокусных электронных пучков с тонкими фольгами показали, что влияние собственного магнитного поля приводит к эффекту аномального поглощения энергии [1]. Для анализа природы этого эффекта и решения ряда других задач физики взаимодействия, связанных с построением электронных траекторий в веществе и магнитном поле, необходимо исследовать влияние магнитного поля на угловое распределение электронов.