

10;12

Электронный спектрограф на основе гиперболического электростатического поля

© Л.А. Баранова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: l.baranova@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 5 апреля 2011 г.)

Исследованы электронно-оптические свойства энергоанализатора, представляющего собой плоский конденсатор с линейным распределением потенциала на верхнем электроде. Показано, что условия фокусировки первого порядка в таком анализаторе не зависят от энергии частиц, а линейная дисперсия пропорциональна квадратному корню из энергии. Такой анализатор способен обеспечить одновременную регистрацию электронного спектра в широком энергетическом диапазоне, т.е. работать в режиме спектрографа. Найдены условия двойной фокусировки в анализаторе типа коробки, что позволяет повысить светосилу спектрографа в несколько раз.

Введение

Большинство известных электронных энергоанализаторов работают в режиме спектрометра, т.е. в приборе имеется один детектор и электронный спектр регистрируется последовательно в процессе сканирования по энергии. В тех случаях, когда интересующий нас энергетический диапазон велик, как, например, в оже- или в фотоэлектронной спектроскопии, где характеристические пики лежат в области от десятков электрон-вольт до примерно 2500 eV (т.е. в энергетическом диапазоне 1 : 25), такой способ регистрации требует слишком длительного времени. Он становится вовсе неприемлемым, когда исследуются процессы, развивающиеся во времени. В этих случаях полный спектр необходимо измерять несколько раз через короткие промежутки времени, с тем чтобы по изменению формы и величины пиков судить о процессах, происходящих на поверхности образца, таких как абсорбция, разрушение под действием электронного удара и т.д.

Данная задача может быть решена с помощью спектрографа, осуществляющего одновременную регистрацию всего спектра, лежащего в интересующем нас энергетическом диапазоне. В качестве приемников электронов могут быть использованы позиционно чувствительные детекторы (ПЧД), эксплуатационные качества которых неуклонно совершенствуются в последнее время. Основная проблема состоит в поиске и практической реализации такого распределения электростатического поля, которое осуществляло бы одновременную фокусировку на плоском детекторе электронных потоков с энергией, различающейся в десятки раз.

До последнего времени была известна только одна конфигурация поля, обладающая таким свойством, — это плоский конденсатор. Однако он не подходит для решения поставленной задачи, поскольку дисперсия плоского конденсатора линейно растет с энергией электронов, вследствие чего при регистрации спектра в

энергетическом диапазоне 1 : 25 прибор должен или иметь неприемлемо большую длину, или обладать очень плохим разрешением в области малых и средних энергий.

В работах [1,2] было предложено использовать гиперболическое поле для параллельной регистрации электронных спектров в большом энергетическом диапазоне. Такое поле формируется, например, квадрупольной линзой. В работе [1] показано, что гиперболическое поле осуществляет фокусировку первого порядка по углу влета всех электронных потоков независимо от их энергии и обладает дисперсией, пропорциональной корню квадратному из энергии электронов. Следовательно, протяженность спектра вдоль детектора существенно уменьшается по сравнению с плоским конденсатором. Это поле двумерно и, так же как и плоский конденсатор, фокусировкой в направлении, перпендикулярном плоскости дисперсии, не обладает, вследствие чего телесный угол сбора электронов — светосила анализатора невелик по сравнению, например, с цилиндрическим зеркалом.

В работах [3,4] рассмотрена возможность создания спектрографа на базе цилиндрического зеркала, отличающегося большим телесным углом сбора электронов. Проведено численное моделирование цилиндрического зеркала, на внешний электрод которого подан потенциал, линейно возрастающий вдоль оси прибора, в результате чего внутри анализатора формируется распределение электрического поля, близкое к гиперболическому. Это направление представляется перспективным, хотя данная конструкция уже не обладает свойством независимости условий фокусировки первого порядка от энергии электронов, поэтому необходимо эмпирически подбирать закон распределения потенциала на внешнем цилиндре, который обеспечил бы удовлетворительную фокусировку в требуемом энергетическом диапазоне.

В настоящей работе для формирования гиперболического поля предложено использовать плоский конденса-

тор с линейным распределением потенциала на верхнем электроде. С помощью программы СРОЗД [5] проведено численное исследование такого анализатора. Рассмотрена возможность увеличения светосилы анализатора за счет создания фокусирующего действия в направлении, перпендикулярном плоскости дисперсии, т.е. за счет создания двойной фокусировки.

Численное моделирование плоского зеркала с линейным распределением потенциала вдоль отражающего электрода

Двумерное гиперболическое поле (поле квадрупольной линзы) описывается формулой

$$\Phi(y, z) = V \frac{yz}{d^2}. \quad (1)$$

В плоскости $y = 0$ потенциал равен нулю, а в плоскости $y = d$ потенциал меняется линейно с координатой z :

$$\Phi(z) = V \frac{z}{d}. \quad (2)$$

Отсюда видно, что гиперболическое поле (1) может быть сформировано между двумя пластинами плоского конденсатора, если нижний электрод конденсатора (плоскость $y = 0$) заземлить, а на верхний электрод (плоскость $y = d$) подать потенциал, линейно меняющийся с координатой z согласно формуле (2). Для энергетического анализа используется только одна четверть поля квадрупольной линзы (область положительных значений y и z), поэтому с одной стороны (плоскость $z = 0$) пластины конденсатора следует соединить перпендикулярным к ним плоским электродом под нулевым потенциалом. Таким образом, получаем конструкцию, в которой два перпендикулярных друг другу электрода заземлены, а на третий электрод (параллельный первому электроду и перпендикулярный второму) подается потенциал, меняющийся линейно в направлении z от нуля до значения $W = VL$, где L — длина конденсатора.

Нами проведено численное моделирование такого анализатора с помощью трехмерной программы СРОЗД, которая позволяет задавать на электродах потенциал, линейно меняющийся с координатой z . За единицу длины принято расстояние между пластинами конденсатора d . В приборах, предназначенных для оже- или для фотоэлектронной спектроскопии, это расстояние обычно равно нескольким сантиметрам. Размеры пластин конденсатора составляют $5d$ в направлении оси z и $6d$ в поперечном направлении. В плоскости $z = 0$ пластины соединены сплошным заземленным электродом. Поскольку пластины конденсатора имеют конечные размеры, то для компенсации искажений поля на краях по периметру анализатора на расстояниях $y = 0.33d$ и $y = 0.66d$ от нижней пластины размещены две тонкие

прямоугольные рамки, на которые подан потенциал, рассчитанный по формуле (1).

Численное моделирование показало, что:

— если источник электронов расположен на нижней пластине в точке $z = 0, y = 0$, то условия фокусировки первого порядка по углу влета электронов не зависят от их энергии. Угол влета (угол между направлением скорости и нижней пластиной), при котором происходит фокусировка, равен $\alpha = 24.7^\circ$;

— положение фокуса на оси z пропорционально корню квадратному из энергии электронов.

Фокусировка электронов происходит на нижней пластине конденсатора, где и следует разместить позиционно чувствительный детектор, что технически не вызывает затруднений. Однако расположить на нижней пластине или непосредственно вблизи нее исследуемый образец практически невозможно. Для того чтобы исследуемый образец можно было облучать пучком заряженных частиц или квантов, он должен быть удален от анализатора на достаточное расстояние. Поэтому следующим этапом было исследование электронно-оптических свойств гиперболического зеркала в том случае, когда

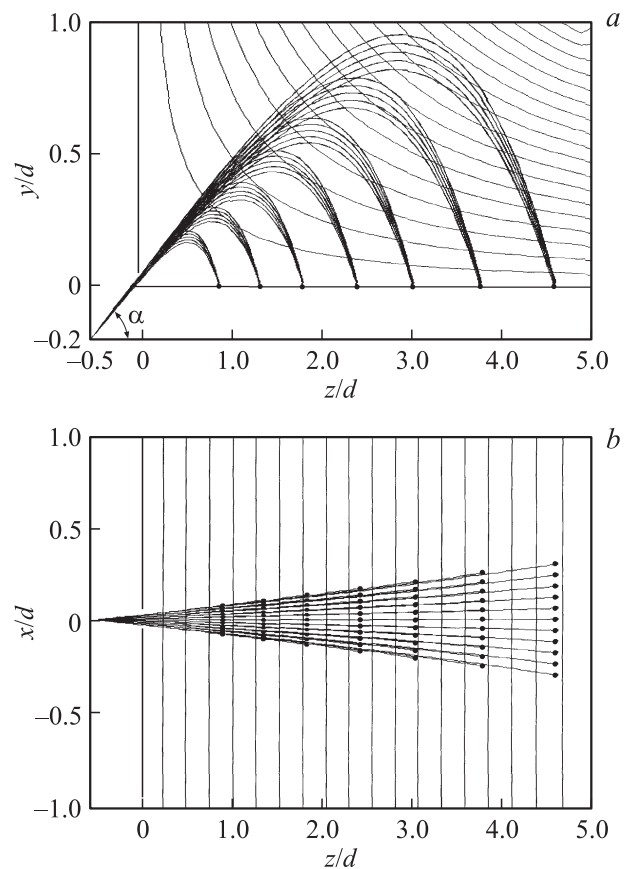


Рис. 1. Траектории электронов и эквипотенциали в плоском конденсаторе с линейным распределением потенциала на верхнем электроде при вынесенном источнике: *a* — эквипотенциали и траектории в плоскости дисперсии yz ; *b* — эквипотенциали в плоскости $y = 0.5d$ и проекции траекторий на плоскость xz .

Таблица 1. Электронно-оптические характеристики анализатора с гиперболическим полем при источнике, расположенном на нижней пластине

E_n/E_1	z_{foc}/d	D/d	ρ	$\Delta x/d$
1.0	0.83	0.41	0.005	0.05
2.2	1.23	0.61	0.005	0.07
4.0	1.66	0.83	0.005	0.10
7.0	2.19	1.09	0.005	0.13
11.0	2.75	1.37	0.005	0.16
17.0	3.42	1.71	0.005	0.20
25.0	4.15	2.08	0.005	0.25

Примечание. z_{foc} — положение фокуса на оси z , D — линейная дисперсия, $\rho = \Delta E/E$ — разрешение по основанию пика и Δx — половина длины спектральной линии. Угол влета равен $\alpha = 24.7^\circ$.

Таблица 2. Электронно-оптические характеристики анализатора с гиперболическим полем при источнике, вынесенном в точку $z = -0.5d$ и $y = -0.2d$. Угол влета $\alpha = 23.26^\circ$

E_n/E_1	z_{foc}/d	D/d	ρ	$\Delta x/d$
1.0	0.92	0.46	0.012	0.08
2.2	1.37	0.68	0.008	0.11
4.0	1.85	0.92	0.007	0.13
7.0	2.44	1.22	0.009	0.17
11.0	3.07	1.53	0.010	0.21
17.0	3.81	1.91	0.011	0.25
25.0	4.63	2.32	0.012	0.30

источник вынесен. Входная щель располагалась в заземленной боковой пластине ($z = 0$) в месте ее соединения с нижней пластиной. (Если расположить щель в нижней пластине, то она будет в 2.5 раза шире вследствие того, что угол влета существенно меньше 45°). Положение источника было задано как $z = -0.5d$ и $y = -0.2d$.

Рисунок 1 иллюстрирует результаты численного моделирования. На рис. 1, *a* показаны эквипотенциалы гиперболического поля и траектории электронов в плоскости дисперсии yz , на рис. 1, *b* — эквипотенциалы в плоскости $y = 0.5d$ и проекции траекторий на плоскость xz , перпендикулярную плоскости дисперсии. Кружками отмечены точки пересечения электронов с нижним электродом конденсатора. Электроны распределены в семи энергетических каналах: $E_n/E_1 = 1, 2.2, 4, 7, 11, 17, 25$, где E_1 — энергия электронов в первом канале и E_n — энергия электронов в n -м канале. Угол влета $\alpha = 23.26^\circ$, угол раствора пучка в плоскости дисперсии равен $\Delta\alpha = 2^\circ$, в перпендикулярной плоскости угол раствора равен $2\gamma = 5.7^\circ$.

Исследование показало, что при вынесенном источнике условия фокусировки первого порядка в гиперболическом поле уже слегка зависят от энергии электронов. Если угол влета электронов подобран так, что фокусировка первого порядка выполняется в середине исследуемого энергетического диапазона, то пучки элект-

тронов меньших энергий окажутся сфокусированными в плоскости, расположенной слегка выше нижней пластины конденсатора, а электроны больших энергий будут сфокусированы чуть-чуть ниже нижней пластины. Этот эффект незначителен, однако разрешающая способность анализатора все-таки ухудшается.

В табл. 1 и 2 приведены некоторые характеристики анализатора с гиперболическим полем для двух случаев: источник электронов расположен на нижней пластине в точке $z = 0, y = 0$, и источник электронов вынесен в точку $z = -0.5d$ и $y = -0.2d$ соответственно. Градиент потенциала на верхней пластине V удовлетворяет условию $eV/E_1 = 4$.

Из сравнения двух таблиц видно, что разрешение анализатора $\rho = \Delta E/E$ с вынесенным источником в 1.5–2 раза хуже, чем разрешение анализатора с источником на краю поля. Длина спектральной линии при вынесении источника несколько увеличивается.

На практике линейное возрастание потенциала вдоль электрода осуществить сложно, поэтому, как правило, его заменяют кусочно-постоянным распределением, для чего электрод разрезают на несколько частей. Проведено численное моделирование плоского конденсатора, верхний электрод которого разделен на десять частей и на каждую часть подан потенциал, равный потенциалу в средней точке этой части при линейном распределении. Расчеты показали, что электронно-оптические свойства анализатора при этом практически не изменились. В случае вынесенного источника потенциалы на отдельных частях верхнего электрода можно настраивать независимо (т.е. отступать от линейного закона) так, чтобы оптимизировать фокусировку на краях исследуемого энергетического диапазона.

Анализатор с двойной фокусировкой

Для повышения светосилы исследуемого анализатора была рассмотрена возможность создания фокусировки электронов в направлении, перпендикулярном плоскости дисперсии, — в направлении оси x . В качестве первого шага разместили в плоскостях $x = \pm 0.5d$ два плоских электрода, перпендикулярных электродам самого конденсатора и параллельных оси z . Эта конструкция аналогична коробчатому анализатору, описанному в [6]. На два боковых электрода подали такой же линейный потенциал, какой приложен к верхнему электроду. Установка боковых электродов изменила структуру поля внутри анализатора, оно более не описывается формулой (1) и может быть названо квазигиперболическим. Качество фокусировки в плоскости дисперсии ухудшилось. Если условия фокусировки выполнены в середине исследуемого диапазона, то в области малых энергий фокусировка оказывается слишком сильной, а в области больших энергий — недостаточной. В направлении, перпендикулярном плоскости дисперсии, наоборот, электроны малых энергий оказываются недофокусированными, а

электроны больших энергий — перефокусированными. Исследования показали, что этот эффект можно скорректировать, если расположить боковые пластины под углом к оси так, чтобы в области малых энергий они были ближе к оси, а в области больших энергий — дальше от оси. Расстояние между пластинами и угол разворота необходимо оптимизировать.

В процессе оптимизации была найдена конфигурация, обеспечивающая удовлетворительную фокусировку в обоих взаимно перпендикулярных направлениях. Расстояние между боковыми пластинами в плоскости $z = 0$ составляет $0.44d$, а в плоскости $z = 5d$ оно равно $1.9d$, т.е. угол наклона боковой пластины по отношению к оси z составляет 8.3° . Градиент потенциала на верхней пластине V подбирался так, чтобы электроны максимальной энергии проходили вблизи верхнего электрода, он существенно возрастает по сравнению с двумерным случаем и равен $eV/E_1 = 7$.

Рисунок 2 иллюстрирует режим двойной фокусировки в коробчатом анализаторе. На рис. 2, *a* показаны эквипотенциалы в плоскости дисперсии и проекции траекторий электронов на эту плоскость. На рис. 2, *b* показаны эк-

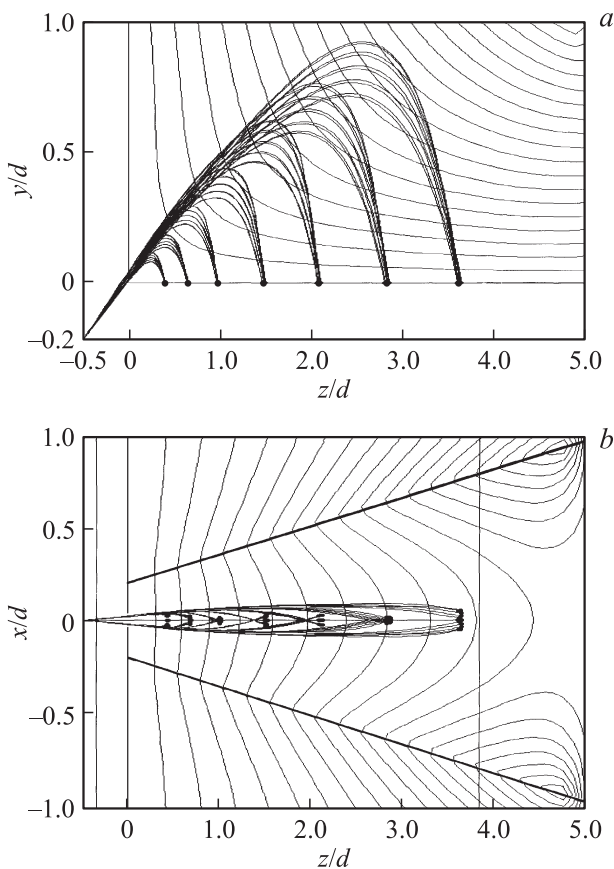


Рис. 2. Траектории электронов и эквипотенциалы в анализаторе типа коробки с линейным распределением потенциала на верхнем и боковых электродах: *a* — эквипотенциалы и проекции траекторий на плоскость дисперсии yz ; *b* — эквипотенциалы в плоскости $y = 0.5d$ и проекции траекторий на плоскость xz .

Таблица 3. Электронно-оптические характеристики анализатора с двойной фокусировкой при источнике, вынесенном в точку $z = -0.5d$ и $y = -0.225d$. Угол влета $\alpha = 26.1^\circ$

E_n/E_1	$z_{\text{фоc}}/d$	D/d	ρ	$\Delta x/d$
1.0	0.42	0.23	0.051	0.032
2.2	0.66	0.42	0.020	0.022
4.0	0.99	0.70	0.017	0.016
7.0	1.50	1.14	0.025	0.027
11.0	2.10	1.55	0.030	0.026
17.0	2.85	1.93	0.027	0.017
25.0	3.63	2.16	0.018	0.052

випотенциалы в плоскости $y = 0.5d$ и проекции траекторий на нижнюю пластину. Источник электронов расположен вне анализатора в точке $z = -0.5d$, $y = -0.225d$. Угол влета $\alpha = 26.1^\circ$, угол раствора пучка в плоскости дисперсии равен $\Delta\alpha = 2^\circ$, в перпендикулярной плоскости угол раствора пучка составляет $2\gamma = 5.7^\circ$.

На рис. 2, *b* эквипотенциалы показаны и за пределами наклонных боковых электродов, т.е. за пределами рабочей области анализатора. Это связано с тем, что при компьютерном моделировании боковые пластины вставлялись в первоначальную прямоугольную конструкцию с тем, чтобы можно было варьировать их угол разворота, не меняя геометрию верхней и нижней пластин. Естественно, что программа СРОЗД рассчитывает поле во всем пространстве между пластинами конденсатора.

Из рис. 2, *b* видно, что фокус в направлении, перпендикулярном плоскости дисперсии, для некоторых энергетических каналов не совпадает с нижней пластиной, а находится несколько выше или ниже нее (точки пересечения траекторий с нижней пластиной отмечены на рисунке черными кружками). Тем не менее длина спектральных линий в этом направлении существенно уменьшилась по сравнению с двумерным случаем (рис. 1, *b*) и, следовательно, увеличился телесный угол сбора электронов.

В табл. 3 приведены электронно-оптические параметры анализатора с двойной фокусировкой. Разрешение по сравнению с двумерным случаем ухудшилось примерно в два раза, а длина линии в поперечном направлении уменьшилась в несколько раз (от трех раз в области малых энергий до десяти раз в области больших). Следовательно, телесный угол сбора электронов вследствие двойной фокусировки увеличился во всем энергетическом диапазоне в несколько раз. Если уменьшить ширину входной щели в коробчатом анализаторе с тем, чтобы получить такое же разрешение, как в двумерном случае, то в области малых энергий выигрыш в светосиле оказывается сравнительно небольшим, в области средних и больших энергий светосила возрастает в несколько раз.

Заключение

Проведено численное исследование электронно-оптических свойств плоского конденсатора с линейным распределением потенциала на верхнем электроде. Исследованы два случая: источник расположен на краю поля в точке с нулевым потенциалом, и источник вынесен за пределы анализатора.

Показано, что фокусировка первого порядка в таком анализаторе не зависит от энергии электронных потоков, и дисперсия анализатора пропорциональна корню квадратному из энергии электронов.

Исследован анализатор типа коробки с линейным распределением потенциала на верхнем и боковых электродах, формирующий квазигиперболическое поле. Найдены режимы работы, в которых осуществляется двойная фокусировка в широком энергетическом диапазоне. Получен выигрыш в светосиле в несколько раз по сравнению с двумерным случаем.

Показано, что замена линейного распределения потенциала на электродах анализатора на кусочно-постоянное распределение практически не влияет на электронно-оптические характеристики, если число ступеней порядка десяти.

Полученные результаты позволяют рекомендовать плоский конденсатор с линейным распределением потенциала на отражающем и боковых электродах для параллельного анализа электронных потоков в широком энергетическом диапазоне, т.е. для работы в качестве электронного спектрографа.

Список литературы

- [1] Jacka M., Kirk M., El Gomati M.M., Prutton M. // *Rev. Sci. Instrum.* 1999. Vol. 70. N 5. P. 2282–2287.
- [2] Jacka M., Kale A., Traitter N. // *Rev. Sci. Instrum.* 2003. Vol. 74. N 10. P. 4298–4300.
- [3] Read F.H. // *Rev. Sci. Instrum.* 2002. Vol. 73. N 3. P. 1129–1139.
- [4] Read F.H., Cubric D., Kumashiro S., Walker A. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* 2004. Vol. A. 519. P. 338–344.
- [5] CPO programs, available from www.electronoptic.com
- [6] Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978. 224 с.