

# Электронные и ионные пучки

УДК 539.1

## Система монохроматизации электронного пучка

Т. Я. Фишкова

*Предложена электростатическая система, предназначенная для получения моноэнергетического электронного пучка. Она состоит из основного фильтра по энергии в виде плоского зеркала с закрытыми торцами и дополнительного плоского конденсатора, компенсирующего начальный разброс по энергии. Получена аналитическая формула связи напряженностей этих полей. Проведены численные расчеты системы, которые показали, что энергетический разброс в электронном пучке на линии фокусов уменьшился на порядок по сравнению с начальным тепловым разбросом.*

PACS: 41.75.Fr

*Ключевые слова:* электроны, монохроматизация, плоский конденсатор.

### Введение

Для изучения структуры вещества в рамках решения задачи по определению потенциалов ионизации различных атомов и молекул требуется монохроматический источник электронов, различие по энергии в котором должно быть значительно меньше естественного теплового разброса. Такая задача теоретически уже решена в работе [1] с помощью двух цилиндрических конденсаторов. В качестве основного энергофильтра служит цилиндрический дефлектор с фокусировкой первого порядка на границе поля, в том числе когда источник также находится на границе поля ( $127^\circ$ -дефлектор Юза-Рожанского). Вплотную к нему установлен дополнительный цилиндрический конденсатор с малым угловым размером. Приведена формула коэффициента, связывающего напряженности основного и дополнительного полей, которые обеспечивают моноэнергетичность электронного пучка. Соответственно, в работе [2] рассчитаны профили энергетического распределения электронов в монохроматоре по схеме [1]. Этот монохроматор состоит из основного  $90^\circ$ -цилиндрического дефлектора и дополнительного цилиндрического конденсатора с угловым размером, равным  $12^\circ$ . Расчеты показали, что разброс по энергии в пучке на линии фокусов уменьшился на полувысоте пика в 17 раз, по его основанию — в 6 раз.

Существенным недостатком таких систем является наличие не учитываемых при расчете краевых эффектов, связанных с наложением полей цилиндрических конденсаторов. Кроме того, у систем, предложенных в работе [1], мала светосила из-за наличия aberrаций второго порядка. В данной работе предпринята попытка устранения отмеченных недостатков в системах монохроматизации пучка.

### Результаты

Автор настоящей работы предлагает использовать для решения вышеуказанной задачи систему из плоских электродов. В качестве основного фильтра по энергии электронов служит плоский конденсатор в зеркальном режиме работы. На его выходе установлен дополнительный плоский конденсатор. Его обкладки-электроды перпендикулярны линии, на которой плоское зеркало фокусирует по углу пучки электронов различных энергий.

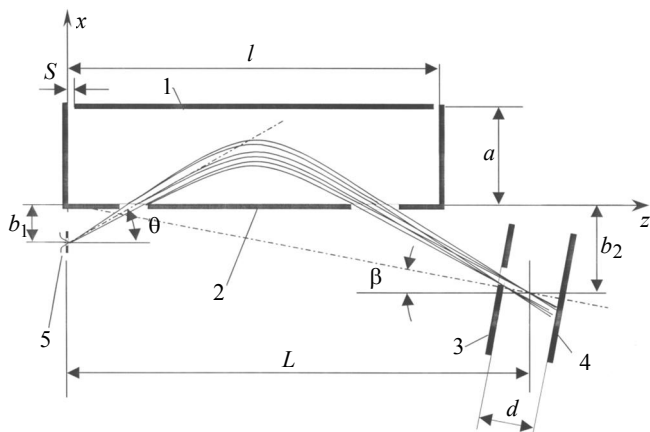
На рисунке приведена схема предлагаемого устройства. Во избежание краевых эффектов торцы основного плоского конденсатора, образованного электродами 1 и 2, закрыты пластинами с потенциалами нижнего электрода. Краевое поле дополнительного конденсатора не оказывает влияния на пучок. Это связано с тем, что его рабочая область находится вблизи оси, проходящей через середину электродов 3 и 4, длина которых больше расстояния между ними.

Система работает следующим образом: электростатическое плоское зеркало формирует сфокусированный по углу на одной линии спектр

Фишкова Татьяна Яковлевна, старший научный сотрудник. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН. Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26. Тел. (812) 292-79-51. E-mail: fishkova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 апреля 2010 г.

электронов по энергии, исходящих из катода 5. Для монохроматизации электронного пучка использовано однородное поле, образованное плоскими электродами 3 и 4, которые перпендикулярны линии фокусов плоского зеркала. При этом потенциалы на этих электродах имеют одинаковую по модулю величину, но противоположны по знаку. Кроме того, точка на оси, через которую проходит нулевая эквипотенциаль, совпадает с точкой фокусировки средней начальной энергии пучка  $\varepsilon_0$ , к которой сводятся пучки других энергий.



**Монохроматор электронного пучка из плоских электродов:**

1 и 2 — электроды основного фильтра по энергии;  
3 и 4 — дополнительные электроды; 5 — катод

Процесс монохроматизации разбивается на следующие этапы: электроны различных энергий после выхода из плоского зеркала проходят через электрод 3 с некоторым положительным потенциалом и при этом набирают одинаковую добавочную энергию. В поле дополнительного плоского конденсатора электроны тормозятся до разных энергий. Напряженность этого поля должна иметь такую величину, чтобы электроны средней энергии тормозились до своей первоначальной величины, а электроны меньшей и большей энергий тормозились, соответственно, меньше и больше до средней начальной энергии  $\varepsilon_0$ .

Формула напряженности дополнительного однородного поля  $E_M$ , обеспечивающая в первом приближении монохроматизацию пучка заряженных частиц, имеет вид:

$$E_M = \Delta\varepsilon_0 / (e\Delta z), \quad (1)$$

где  $e$  — заряд частицы;

$\Delta z$  — расстояние между точками фокусировки пучка с разбросом по энергии  $\Delta\varepsilon_0$ , величина которого определяется дисперсией по энергии плоского зеркала:

$$\Delta z = D (\Delta\varepsilon_0 / \varepsilon_0), \quad (2)$$

где  $D$  — коэффициент линейной дисперсии плоского зеркала, который равен  $D = L / 2\cos^2 \theta$  для всех энергоанализаторов зеркального типа. Здесь  $\theta$  — угол входа в поле зеркала центральной траектории пучка,  $L$  — расстояние между источником и его изображением при условии фокусировки первого порядка по углу, полученное с использованием формул, приведенных в монографии [3]:

$$L = (2\varepsilon_0 / eE_0) \sin 2\theta(1 + \cos 2\theta), \quad (3)$$

где  $E_0$  — напряженность поля плоского зеркала.

Подставляя формулы (2) и (3) в (1), получим коэффициент, связывающий напряженности дополнительного и основного полей:

$$K = E_M / E_0 = \operatorname{ctg} \theta / [2(1 + \cos 2\theta)]. \quad (4)$$

Для создания дополнительного поля, обеспечивающего монохроматизацию пучка, необходимо, чтобы линия фокусов частиц разных энергий располагалась вне поля плоского зеркала. Это означает, что углы входа пучка в поле должны быть меньше  $45^\circ$ . (При  $\theta = 45^\circ$  источник и его фокус находятся на границе поля.) Следует отметить, что линия фокусов наклонена к нижней пластине плоского зеркала под некоторым углом  $\beta$ , определяемым в работе [3] в виде соотношения:

$$\operatorname{tg} \beta = (\operatorname{tg} \theta \cos 2\theta) / (1 + \cos 2\theta).$$

Известно, что при фокусировке первого порядка по углу размер пятна  $\Delta L$  в плоскости дисперсии, создаваемого различными электронно-оптическими системами, определяется их аберрациями:

$$\Delta L = C_2 \alpha^2 + C_3 \alpha^3 + \dots,$$

где  $C_2$  и  $C_3$  — коэффициенты аберраций второго и третьего порядка;

$\pm\alpha$  — начальный угол раствора пучка.

В плоскости дисперсии плоского зеркала имеем следующее выражения:

$$C_2 = [L(1 - 4 \sin^2 \theta)] / (2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta); \quad (5)$$

$$C_3 = [L(\cos^4 \theta + 3 \sin^4 \theta)] / (3 \sin^3 \theta \cos^3 \theta). \quad (6)$$

Как в плоском, так и в цилиндрическом дефлекторах фокусировка в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии, отсутствует, поэтому в ней размер пучка равен  $h = 2L \operatorname{tg} \alpha$ . Из формулы (5) видно, что  $C_2 = 0$  при  $\theta = 30^\circ$ . Поскольку у цилиндрического дефлектора существуют аберрации второго порядка, размер изображения в плоском зеркале значительно меньше. Коэффициент аберрации второго порядка цилиндрического дефлектора  $A$  зависит от величины его секторного угла и меняется в пределах  $A = -(0,5-1)r_0$ , где  $r_0$  — радиус кривизны центральной траектории пучка (см. [3]).

Для плоского зеркала с углом входа центральной траектории пучка  $\theta = 30^\circ$  из формулы (6) получается величина  $C_3 = -3,08 L$ . При одинаковых габаритах обоих устройств  $L \approx 2r_0$  и растворе пучка на входе, меняющимся в пределах  $\alpha = (0,25—1)^\circ$ , размер изображения в плоском зеркале от 73 до 9 раз меньше, чем в цилиндрическом дефлекторе. Поэтому преимуществом предлагаемой системы перед системой [1] является более высокая интенсивность электронного пучка.

Следует отметить, что в предлагаемой системе электроны с большим разбросом по энергии, превышающим тепловой разброс (например, из-за неодинакового потенциала на катоде в области эмиссии), можно отсекают соответствующим подбором размера выходного отверстия в нижнем электроде плоского зеркала. Другим преимуществом исследованной системы на плоских электродах является то обстоятельство, что дополнительные электроды 3 и 4 могут быть использованы по двойному назначению: во-первых, для создания поля, компенсирующего разброс электронов по энергии; во-вторых, они могут располагаться в камере ионизации, где происходит бомбардировка атомов и молекул электронами, и при этом служить элементами ионно-оптических систем различных приборов и устройств, для работы которых тоже необходима монохроматизация электронного пучка.

Характеристики предлагаемой системы рассчитаны численно по программе ТЕО для плоской задачи. Для общности, геометрические параметры выражены в единицах межэлектродного расстояния плоского зеркала  $a$ , а средняя энергия электронов  $\varepsilon_0 = -e\Phi_0$ , к которой сводится энергия пучка, принята за единицу ( $\Phi_0$  — ускоряющий потенциал). При других энергиях электронов электрические параметры системы следует изменить пропорционально величине энергии. Расстояние между торцевыми электродами плоского зеркала  $l = 5a$ , расстояние между компенсирующими электродами 3 и 4  $d = 0,4a$ . Зазор между электродом плоского зеркала 1, определяющим поле, и торцами равен  $S = 0,05a$ . Электрод 2, а также торцевые электроды заземлены. Источником электронного пучка служит точечный катод 5, расположенный на расстоянии по нормали от нижнего электрода  $b_1 = 0,4a$ . Начальный угол впуска центральной траектории пучка  $\theta = 30^\circ$ , угол раствора пучка менялся в пределах  $\alpha = \pm(0,25—1)^\circ$ .

При указанных геометрических параметрах величина потенциала на электроде 1 основного плоского зеркала, необходимая для фокусировки первого порядка по углу, равна  $V_1 = -0,667 \Phi_0$ . При этом линия фокусов расположена под углом  $\beta = 12^\circ$  к электроду 2, а точка фокусировки траек-

торий пучка средней энергии отстоит от него на расстоянии  $b_2 = 0,43a$ . Из формулы (4) коэффициент, определяющий напряженность компенсирующего поля по отношению к основному, равен  $K = 0,577$ . Поэтому после несложных преобразований для указанной выше геометрии и режима работы плоского зеркала потенциалы дополнительных электродов 3 и 4 оказались равными  $U = \pm 0,077 \Phi_0$ , соответственно. Однако численные расчеты показали, что разброс по энергии в пучке минимален, когда величина компенсирующих потенциалов несколько отличается от теоретической и равна  $U = \pm 0,070 \Phi_0$ . При этом для указанных выше углов раствора пучка его размер в плоскости дисперсии равен  $g/a = (2—7) \cdot 10^{-3}$ , а в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии,  $h/a = (3,5—14,1) \cdot 10^{-2}$ .

Степень монохроматизации электронного пучка определялась как отношение его начального разброса по энергии к конечному, т. е.  $G = \Delta\varepsilon_0/\Delta\varepsilon$ . Численные расчеты по определению конечного разброса по энергии в пучке были проведены при изменении начальной энергии в пределах  $\Delta\varepsilon_0/\Delta\varepsilon = \pm 0,01$ . При указанных выше геометрических и электрических параметрах системы уменьшение энергетического разброса на линии фокусов для центральных траекторий пучков различных энергий, выходящих из катода под углом  $\theta = 30^\circ$ , оказалось равным  $G = 20—12$ . Минимальное уменьшение энергетического разброса для электронных пучков в целом с начальными углами раствора  $\alpha = \pm 0,25^\circ$  равно  $G = 10$ ; с углами раствора  $\alpha = \pm 0,5^\circ$  значение  $G = 5$ , а при  $\alpha = \pm 1^\circ$  величина  $G = 3$ . В случае равномерного распределения плотности тока интенсивность пучка увеличивается пропорционально квадрату угла его раствора при соответствующем увеличении размера щели в плоскости, перпендикулярной плоскости дисперсии. Следует отметить, что вблизи линии фокусов имеется область, в которой энергетический разброс в пучке также уменьшается. Расчеты показали, что благодаря острой фокусировке в плоскости дисперсии внутри области, расположенной на расстоянии  $\pm 0,005a$  от линии фокусов, степень монохроматизации увеличивается в три — четыре раза. Это обеспечивает дополнительное увеличение интенсивности моноэнергетичного пучка.

### Заключение

В работе рассмотрена система монохроматизации электронного пучка на плоских электродах. Получены аналитические выражения ее параметров. Проведены численные расчеты оптимального

варианта такой системы. На основании проделанной работы можно сделать следующие выводы:

пропорциональное изменение геометрии не влияет на электронно-оптические свойства системы;

существует электрическое подобие для пучков электронов с различными энергиями;

предлагаемая система имеет три преимущества перед известным монохроматором из цилиндрических электродов, поскольку она обеспечивает:

1) увеличение интенсивности электронного пучка из-за отсутствия aberrаций второго порядка;

2) возможность избавления от электронов с недопустимо большим разбросом по энергии;

3) возможность использования дополнительных электродов не только для создания компенсирующего поля, но и в качестве элементов ионно-

оптических систем в источнике ионов различных устройств.

*Автор признателен В. А. Суркову  
за формулировку задачи о необходимости  
монохроматизации электронного пучка  
для источника ионов монополярного  
масс-спектрометра.*

#### Л и т е р а т у р а

1. Marmet P. // Rev. Sci. Instr. 1968. V. 39. No. 12. P. 1932.
2. Roy D., Carette J. D. // Rev. Sci. Instr. 1971. V. 42. No. 6. P. 776.
3. Афанасьев В. П., Явор С. Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. — М.: Наука, 1978.

## System of electron beam monochromatisation

*T. Ya. Fishkova*

Ioffe Physicotechnical Institute of the RAS, 26 Polytechnic str., St. Petersburg, 194021, Russia

E-mail: fishkova@mail.ru

*An electrostatic system to be used for monochromatisation of an electron beam has been proposed. It consists of the basic filter on energy in the form of the flat capacitor with the closed ends in a mirror operating mode and the additional capacitor compensating the initial energy spread. The analytical formula of the field strengths relationship has been obtained. Calculation of this system has shown that the electron beam energy spread has become about 10 times less than the initial thermal spread.*

PACS: 41.75.Fr

*Keywords:* electrons, monochromatization, flat capacitor.

Bibliography — 3 references.

*Received April 18, 2010*

\* \* \*