

01;10
©1993 г.

ГИПОЦИКЛОИДАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ МОНОХРОМАТОР С НЕОДНОРОДНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ И ЕГО ОПТИМИЗАЦИЯ

Н.И.Романюк, О.Б.Шпенник, И.А.Манди, Ф.Ф.Папп, И.В.Чернышова

На основе оптимизации трохоидального анализатора электронов предложен гипоциклоидальный анализатор электронов с улучшенными разрешением и пропусканием. В отличие от трохоидального в нем использовано неоднородное поперечное поле цилиндрического конденсатора. Приводятся аналитические выражения для разрешения трохоидального и гипоциклоидального анализаторов. Предложен безразмерный параметр, позволяющий оценить оптимальность выбора их характеристик.

Введение

В электронной спектроскопии известно несколько способов анализа энергий заряженных частиц, движущихся в продольном магнитном поле, использующих диспергирующие свойства как магнитного, так и электрического полей [1,2]. Однородное магнитное поле используют в анализаторах с тормозящим полем. Они обладают тем недостатком, что для определения энергетического спектра необходимо дифференцировать интегральную характеристику — кривую задержки. В анализаторах с неоднородным магнитным полем, убывающим или возрастающим в области торможения, возможен анализ электронов не только по продольной, но и по полной составляющей скорости электронов [3,4]. Известен также фильтр Вина с неоднородными поперечными полями, помещенный в слабое продольное магнитное поле [5]. Такие анализаторы имеют сложную систему формирования магнитного поля, на которую к тому же накладываются ограничения на скорость изменения магнитного поля [6,481].

1. Трохоидальный электронный монохроматор

Трохоидальный электронный монохроматор с момента создания [7] стал применяться для исследования рассеяния электронов на атомах и молекулах [8,9], а также на поверхности твердых тел [10,11]. Теория монохроматора подробно рассмотрена в работах [12,13], где рассчитаны основные характеристики.

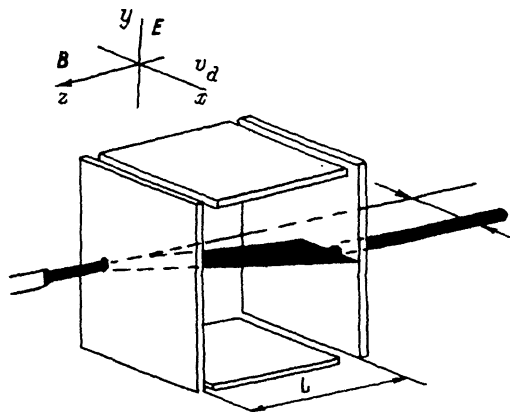


Рис. 1. Схема трохоидального электронного монохроматора.

В таком монохроматоре (рис. 1) электронный пучок формируется в продольном однородном магнитном поле. Его применение позволяет удерживать электроны малых энергий и получать электронные пучки начиная с энергий в сотые доли электрон-вольта. Для селекции электронов используют совместное действие скрещенных магнитного и электрического полей. Анализ уравнений движения показывает, что в таких полях проекция траектории электрона на плоскость XY является трохоидой, производящий круг которой имеет радиус $r_c = E/\eta\beta^2$, где $\eta = e/m$. Скорость движения этого круга, или, что то же самое, скорость дрейфа v_d , зависит только от полей E и B : $v_d = E \times B/B^2$. Пройдя область скрещенных полей, электроны сместятся на расстояние $D = v_d \cdot t$, где t — время пребывания их в этой области. Таким образом, величина смещения D зависит от продольной скорости v_{\parallel}

$$D = \frac{E L}{B v_{\parallel}}, \quad (1)$$

где L — длина области дрейфа.

Выходная диафрагма анализатора, отверстие в которой смещено относительно входного, выделяет частицы с определенной составляющей продольной скорости.

В дальнейшем рассмотрении мы будем исходить из тех же предположений, что и в работах [7,12,13]: а) пренебрегается влиянием пространственного заряда; б) электроны имеют только продольную составляющую скорости; в) длина области дрейфа L велика по сравнению с зазорами между электродами, создающими поперечное электрическое поле, так что краевыми полями можно пренебречь; г) радиус производящей окружности трохоиды мал по сравнению с радиусами входного и выходного отверстий, т.е. основную роль при энергетическом анализе играет дрейфовое движение.

Смещение электрона на выходе трохоидального анализатора зависит от координаты влета в область дрейфа, а именно от координаты Y . Это вызвано действием краевого поля. Так, электроны, входящие в анализатор ближе к положительной пластине (т.е. в область с большим потенциалом), доускоряются, вследствие чего время их пребывания в области

дрейфа уменьшается. Уменьшается и смещение по сравнению с электронами, вошедшими в анализатор у отрицательной пластины. Это приводит к деформации сечения пучка на выходе из анализатора и ухудшает разрешение.

С учетом этого эффекта в работе [13] рассчитана форма пучка на выходе ТЭМ. Для согласования выходного отверстия с пучком предложено использовать на выходе прямоугольную наклонную щель, угол наклона которой относительно направления электрического поля зависит от параметров анализатора. Однако если в анализаторе рассеянных электронов применение такой щели возможно, то в монохроматоре оно нежелательно. Во-первых, в область столкновений желательно вводить аксиально-симметричный (т.е. цилиндрический) пучок, что упрощает геометрию области столкновений, во-вторых, в случае прямоугольного пучка необходимо согласовывать отверстия в монохроматоре и анализаторе по углу наклона. Это затруднительно как по технологическим причинам, так и из-за искажения прямоугольного пучка действием краевых полей диафрагменных линз камеры столкновений и анализатора.

Чтобы минимизировать деформацию пучка на выходе из области дрейфа, мы предлагаем использовать неоднородное поперечное электрическое поле. При этом параметры поля и точка ввода пучка выбираются таким образом, что изменение времени пребывания электрона в области дрейфа, вызванное распределением потенциала электрического поля $\Phi(x, y)$ по входной щели, "компенсируется" изменением скорости дрейфа v_d .

2. Гипоциклоидальный электронный монохроматор

а) Оптимизация. Одна из возможных реализаций монохроматора с неоднородным электрическим полем упоминалась в [7]. Рассмотрим дрейфовое движение электронов в поле цилиндрического конденсатора, ось которого параллельна магнитному полю. Фактически такая геометрия совпадает с геометрией цилиндрического магнетрона [14] (рис. 2).

Электрическое поле E_r и распределение потенциала между обкладками цилиндрического конденсатора описываются формулами

$$E_r = \frac{-(V_2 - V_1)}{r \ln(r_2/r_1)}, \quad (2)$$

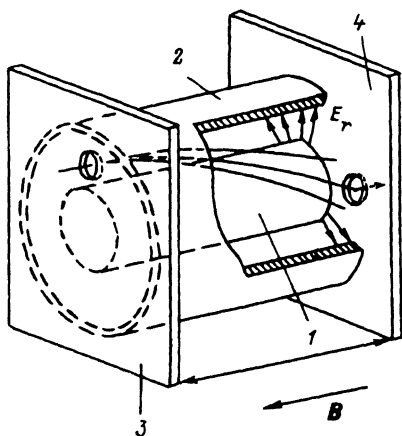


Рис. 2. Схема гипоциклоидального анализатора.

- 1 — внутренний цилиндр;
- 2 — внешний цилиндр;
- 3, 4 — входная и выходная диафрагма;
- E_r — электрическое поле,
- B — магнитная индукция однородного магнитного поля.

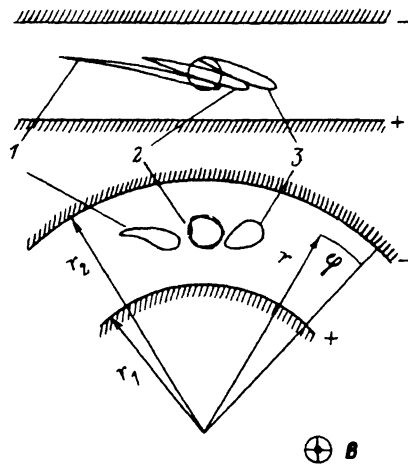


Рис. 3. Профили электронного пучка на выходе ТЭМ и ГЭМ.

$r_1 = 1.5$ мм, $r_2 = 2.5$ мм, $r_0 = 2$ мм, $V_1 - V_2 = 0.44$ В, $B = 1 \cdot 10^{-2}$ Тл; $W_{||, \text{эВ}}$: 1 — 0.16, 2 — 0.21, 3 — 0.27.

$$\Phi_r = \frac{V_2 - V_1}{\ln(r_2/r_1)} \ln(r/r_0). \quad (3)$$

Здесь V_2, V_1 — потенциалы внутреннего и внешнего цилиндров соответственно; r_2, r_1 — их радиусы; r_0 — радиус, на котором находятся центры входного и выходного отверстий (рис. 2). Продольная скорость $v_{||}$ в области дрейфа равна

$$v_{||} = \sqrt{2\eta(W_{||} + \Phi_r)}, \quad (4)$$

где $W_{||}$ — энергия продольного движения в центре входного отверстия при $r = r_0$; $\eta = e/m$.

Эта формула верна на достаточно большом удалении от краев области дрейфа, где отсутствуют продольные составляющие поля конденсатора. Так как длина монохроматора L выбирается обычно в десятки раз большей зазора между обкладками, то ими можно пренебречь.

Наряду с принятым выше предположением γ будем считать, что радиус кривизны эквипотенциальной поверхности, вдоль которой происходит дрейф, значительно больше радиуса производящего круга. В этом случае в первом приближении скорость дрейфа определяется величиной электрического поля E_r в точке влета в область дрейфа. Отсюда, учитывая (1) и (4), получим угол φ , на который продрейфуют электроны на выходе анализатора (рис. 3),

$$\varphi = \frac{D}{r} = \frac{L}{B r} \frac{E_r}{\sqrt{2\eta(W_{||} + \Phi_r)}}. \quad (5)$$

Угол φ будет слабо зависеть от координаты влета r при выполнении условия $d\varphi/dr = 0$, откуда получаем

$$\frac{V_1 - V_2}{W_{||} \ln(r_2/r_1)} = \frac{4}{4 \ln(r/r_0) + 1}. \quad (6)$$

Исходя из смысла входящих в (6) величин, получаем, что для выполнения этого соотношения при $r = r_0$ необходимо $V_1 - V_2 > 0$, т.е. потенциал внутреннего цилиндра должен поддерживаться положительным относительно внешнего. Кроме этого, из (6) следует, что условие “компенсации” выполняется только для определенной энергии электронов. Далее, из (3), (5) и (6) связь между геометрическими параметрами анализатора и величинами полей, при которых выполняется условие компенсации $d\varphi/dr = 0$, дается выражениями

$$\frac{V_1 - V_2}{B^2} = \frac{1}{2}\eta \left(\frac{D}{L}r_0\right)^2 \ln(r_2/r_1), \quad (7a)$$

или

$$\frac{E_r}{B^2} = \frac{1}{2}\eta \left(\frac{D}{L}\right)^2 r_0. \quad (7б)$$

Отметим также, что последнее выражение можно записать в виде

$$P \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{D}{L}\right)^2 \frac{r_0}{r_c} = 1, \quad (7в)$$

где $r_c = E_{r_0}/\eta\beta^2$ — радиус производящего круга трохойды на радиусе r_0 .

Таким образом, величина P из (7в) может служить мерой оптимальности рассматриваемого анализатора. Выбор геометрических размеров анализатора D , L , r_0 фиксирует и соотношение между электрическими и магнитными полями, при которых деформация пучка на выходе анализатора будет минимальной.

Название “трохоидальный” прибор получил по названию кривой, которой является проекция траектории электрона на плоскость, перпендикулярную магнитному полю. В случае поля цилиндрического конденсатора указанная проекция близка к кривой, описываемой точкой круга, катящегося по окружности, совпадающей с эквипотенциалью точки влета. При этом если производящий круг катится по внешней или внутренней стороне окружности, то кривая называется эпи- или гипоциклоидой соответственно [15]. При выполнении условия (6) электроны движутся по траекториям, проекции которых близки к гипоциклоидам. Исходя из этого, оптимизированный вариант монохроматора с цилиндрическим конденсатором можно назвать гипоциклоидальным электронным монохроматором (ГЭМ).

На рис. 3 показаны рассчитанные профили электронного пучка на выходе анализатора, которые в отличие от трохойдального не перекрываются с выходным отверстием. Это означает, что рассмотренная конфигурация обладает более высоким разрешением, чем трохойдальная. Для электронов, энергия которых удовлетворяет (6), отклонение выходного профиля от цилиндрического минимально, что делает возможным увеличение коэффициента пропускания более чем в два раза для одинаковых входного и выходного отверстий.

б) Разрешение. Разрешая (5) относительно W_{\parallel} , для угла φ_d , на котором находится выходное отверстие анализатора, и энергии пропускания W_0 , получим

$$W_{\parallel} = W_0 \left(\frac{\Phi_d}{\varphi}\right)^2 \left(\frac{r_0}{r}\right)^4 - \Phi_r. \quad (8)$$

Используя формулу Тейлора для функции от двух переменных $W_{\parallel}(r, \varphi)$ и оставляя члены не выше второго порядка малости относительно $\Delta r/r$ и $\Delta\varphi/\varphi$, для разрешения получаем

$$\Delta W_{\text{ГЭМ}} = 2W_0 \frac{\Delta\varphi}{\varphi} + \left| 4W_0 + \tilde{V} \right| \frac{\Delta r}{r} + \left| 10W_0 + \frac{\tilde{V}}{2} \right| \left(\frac{\Delta r^2}{r^2} + 8W_0 \frac{\Delta\varphi\Delta r}{\varphi r} + 6W_0 \frac{\Delta\varphi^2}{\varphi^2} \right). \quad (9)$$

Здесь

$$\tilde{V} = \frac{V_2 - V_1}{\ln(r_2/r_1)}, \quad (10)$$

$\Delta\varphi$ — сумма угловых размеров входного и выходного отверстий, Δr — диаметр входного отверстия.

Для выполнения условия компенсации множитель при $\Delta r/r$ должен равняться нулю, что эквивалентно выполнению условия (6). В этом случае из (9) имеем

$$\Delta W_{\text{ГЭМ}} = 2W_0 \frac{\Delta\varphi}{\varphi_d} + W_0 \left\{ 8 \frac{\Delta r^2}{r_0^2} + 8 \frac{\Delta\varphi\Delta r}{\varphi_d r_0} + 3 \frac{\Delta\varphi^2}{\varphi_d^2} \right\}. \quad (11)$$

Для трохоидаального монохроматора, т.е. для плоского конденсатора, распределение потенциала на входной щели задается выражением $\Phi(x, y) = E \cdot y$. Из (1) и (4) для продольной энергии электронов, начавших дрейф в точке $(0, y)$ и проредрейфовавших к точке (x, y) , получаем

$$W_{\parallel}(x, y) = W_0 \left(\frac{D}{x} \right)^2 - E \cdot y. \quad (12)$$

Оставляя члены не выше второго порядка малости относительно $\Delta x/x$ и $\Delta y/y$, для разрешения имеем выражение

$$\Delta w_{\text{ТЭМ}} = 2W_0 \frac{\Delta x}{D} + |E| \cdot \Delta y + 6W_0 \left(\frac{\Delta x}{D} \right)^2. \quad (13)$$

Учтем, что для энергии пропускания W_0 соотношение между смещением D и параметрами монохроматора имеет следующий вид (см. (1))

$$D = \frac{E}{B} \frac{L}{\sqrt{2\eta W_0}}. \quad (14)$$

Окончательно получаем

$$\Delta W_{\text{ТЭМ}} = 2w_0 \frac{\Delta x}{D} + \sqrt{2\eta W_0} B \frac{D}{L} \Delta y + 6W_0 \left(\frac{\Delta x}{D} \right)^2. \quad (15)$$

В таблице приводится сравнение $\Delta W_{\text{ТЭМ}}$ и $\Delta W_{\text{ГЭМ}}$ для идентичных условий, т.е. одинаковых D , L , B и размеров входного и выходного отверстий. При этом принималось, что $\Delta x = \Delta y = \Delta r_0 = \Delta\varphi \cdot r_0 = 0.2$ мм, $D = 3.14$ мм, $r_0 = 2$ мм, $\varphi_d = \Pi/2$, $L = 20$ мм, $B = 1 \cdot 10^{-2}$ Тл.

| $W_0,$ эВ | $\Delta W_{ТЭМ},$ эВ | $\Delta W_{ГЭМ+} \times$ $\times(V_1 - V_2) > 0$ | $\Delta W_{ГЭМ-} \times$ $\times(V_1 - V_2) < 0$ | $\Delta W_{ТЭМ}/$ $/\Delta W_{ГЭМ+}$ | $\Delta W_{ГЭМ-}/$ $/\Delta W_{ГЭМ+}$ |
|--------------|-------------------------|---|---|---|--|
| 0.10 | 0.17 | 0.04 | 0.12 | 4.4 | 3.0 |
| 0.25 | 0.29 | 0.10 | 0.30 | 3.0 | 3.0 |
| 0.50 | 0.44 | 0.19 | 0.60 | 2.3 | 3.0 |
| 0.80 | 0.60 | 0.31 | 0.94 | 2.0 | 3.0 |
| 1.0 | 0.76 | 0.39 | 1.2 | 1.9 | 3.0 |

Как видно, особенно ощутимым выигрыш в применении гипоциклоидального монохроматора становится при малых энергиях пропускания. Однако следует учитывать, что при энергиях пропускания в сотые доли электрон-вольта могут уже сказываться эффекты пространственного заряда и неоднородности потенциалов поверхностей электродов, обращенных к электронному пучку.

Отметим также, что ширина аппаратной функции в случае выполнения условия "компенсации" $\Delta W_{ГЭМ+}$ в три раза меньше ширины аппаратной функции при обратной полярности питания обкладок цилиндрического конденсатора.

3. Характеристики анализаторов

Для сравнения монохроматоров нами были рассчитаны их аппаратные функции. Они вычислялись как доля электронов, вышедших из анализатора, в зависимости от энергии влетающих электронов. Для трохлоидального, т.е. случая однородного электрического поля плоского конденсатора, при вычислении координат вылета использовалось точное аналитическое решение [7]. В случае гипоциклоидального монохроматора, где поперечное электрическое поле создается цилиндрическим конденсатором, уравнения движения интегрировались численно на ЭВМ. На рис. 4 приводятся аппаратные функции для разных размеров выходного

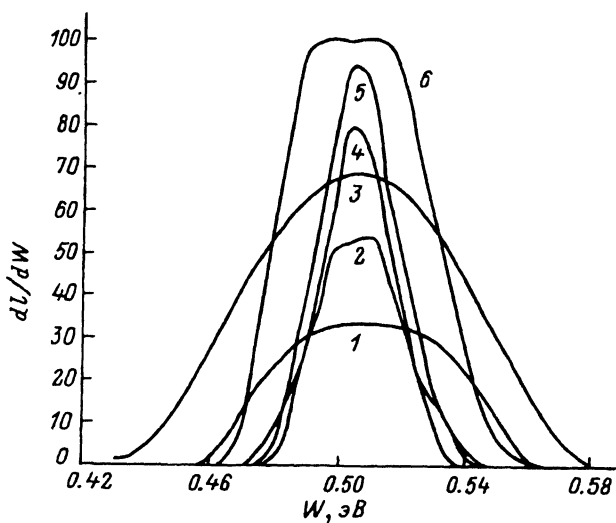


Рис. 4. Аппаратные функции анализаторов при различных выходных отверстиях.
 1-3 — ТЭМ, 4-6 — ГЭМ;
 1,4 — $r \rightarrow r$; 2 — $r \rightarrow 2r$;
 3 — $r \rightarrow 2r$, щель; 5 — $r \rightarrow 1.2r$;
 6 — $r \rightarrow 2r$.

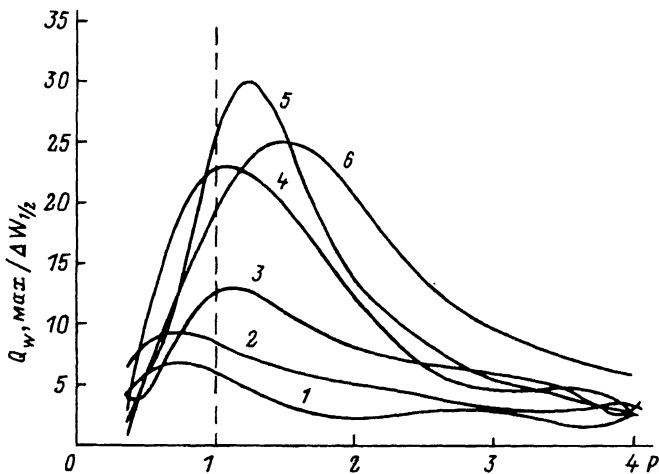


Рис. 5. Зависимость качества аппаратных функций от параметра оптимальности. 1-6 — то же, что и на рис. 4.

отверстия, отцентрированные на энергию 0.5 эВ. Видно, что для первого прибора наилучшей аппаратной функцией обладает вариант с наклонной щелью. Аппаратные функции второго, имея меньшую ширину, существенно превосходят ТЭМ по значению в максимуме. При увеличении радиуса выходной щели от r до $1.2r$ максимальное значение пропускания приближается к 100% за счет электронов на периферии пучка, которые подходят к выходной щели на вершине циклоиды. Плато на аппаратной функции при выходной щели радиусом $2r$ свидетельствует о том, что в отличие от трохоидального анализатора монохроматичное изображение входного отверстия полностью укладывается в выходное отверстие в некотором интервале энергий.

Для сравнения анализаторов нами были рассчитаны также показатели качества аппаратных функций, представляющие собой отношение их высоты к полной ширине на половине высоты. При этом электрическое поле поддерживалось постоянным, а магнитное поле изменялось с расстройкой относительно оптимального значения. На рис. 5 приводятся показатели качества в зависимости от безразмерного параметра P , определенного выражением (7в). Для трохоидального монохроматора можно получить аналогичный параметр. Преобразуя выражения, приведенные в [13], условие наилучшего согласования формы пучка на выходе с наклонной щелью записываются в виде

$$P_T \equiv \left(\frac{D}{L} \right)^2 \frac{D}{\operatorname{tg} \theta r_c} = 1. \quad (16)$$

Здесь θ — угол наклона щели относительно силовых линий электрического поля. Именно P_T принят за параметр оптимальности на рис. 5. Из рисунка видно, что гипоциклоидальный монохроматор существенно превосходит трохоидальный по показателю качества при значениях параметра оптимальности, близких к единице. Отметим, что некоторое увеличение качества при значениях P , превосходящих 1, связано с уменьшением радиуса циклоиды r_c при незначительном изменении формы пучка на выходе анализатора.

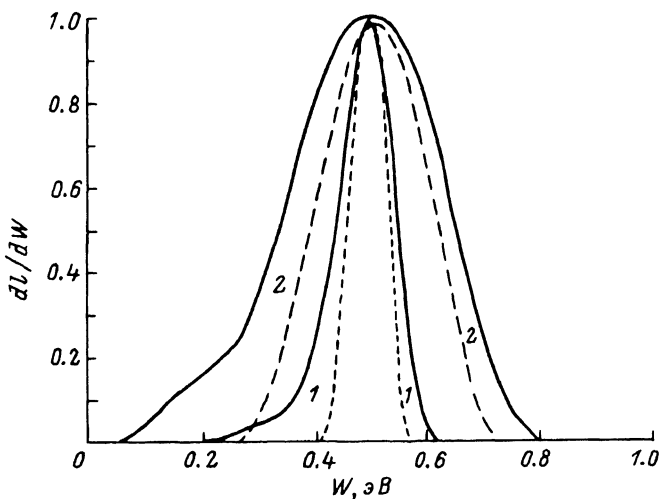


Рис. 6. Энергетические распределения на выходе гипоциклоидального монохроматора.

1 — при оптимальных условиях, ГЭМ+; 2 — при обратном направлении электрического поля E_r , ГЭМ-; сплошные линии — эксперимент, $\Delta W_{1/2-} / \Delta W_{1/2+} = 2.8$; штриховые — расчет, $\Delta W_{1/2-} / \Delta W_{1/2+} = 3.0$.

Нами были испытаны два варианта гипоциклоидального монохроматора со средним радиусом $r_0 = 10$ и 2 мм. Характеристики энергетических распределений для первого варианта почти не отличаются от таковых для трохоидального, что соответствует расчетам. Для прибора с $r_0 = 2$ мм энергетические распределения электронов на выходе измерялись при параметрах, указанных на рис. 3. Энергетические распределения исследовались методом задерживающего потенциала с последующим дифференцированием. При этом измерения проводились как при положительном потенциале на внутреннем электроде, так и при обратной полярности питания обкладок цилиндрического конденсатора. На рис. 6 приводятся экспериментальные и расчетные энергетические распределения электронов. Последние определялись как произведение аппаратной функции и спектра влетающих электронов, отцентрированного на максимум аппаратной функции. Спектр электронов аппроксимировался распределением Гаусса со среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0.1$ эВ. Хотя расчетные распределения несколько уже экспериментальных, отношение ширин $\Delta W_{ГЭМ-} / \Delta W_{ГЭМ+}$ на половине высоты близко к расчетному. Отметим, что найденное из численных потраекторных расчетов отношение ширин совпадает с аналогичным значением, полученным из аналитического рассмотрения гипоциклоидального монохроматора (см. таблицу).

Таким образом, рассмотренный анализатор с неоднородным поперечным электрическим полем цилиндрического конденсатора превосходит обычный трохоидальный анализатор с однородным полем как по разрешению, так и по пропусканию. Этот результат получен в результате выбора таких характеристик электрического поля, при которых форма пучка на выходе анализатора в минимальной мере отличается от цилиндрической. При этом для его оптимизации следует соблюдать условия (7), а для оценки разрешения использовать соотношения (9) и (11).

Список литературы

- [1] *Фридрихов С.А.* Энергоанализаторы и монохроматоры для электронной спектроскопии. Л., 1978. С. 159.
- [2] *Козлов И.Г.* Современные проблемы электронной спектроскопии. М.: Атомиздат, 1978. С. 248.
- [3] *Клавдиев В.В., Герценштейн М.Е.* Электростатический спектрометр. А.С. № 1074310 СССР. МКИ НОИД 49/48.
- [4] *Козлов И.Г.* Устройство для измерения энергии заряженных частиц. А.С. № 1095848 СССР. МКИ НОИД 49/44.
- [5] *Page S.C., Read F.H.* // J.Phys. E: Sci. Instr. 1989. Vol. 22. P. 93-103.
- [6] *Кролл Н., Трайвеллус А.* Основы физики плазмы. М.: Мир, 1975. 525 с.
- [7] *Стаматович А., Шульц Г.* // ПНИ. 1970. № 3. С. 115-119.
- [8] *Schulz G.J.* // Rev. Mod. Phys. 1973. Vol. 45. P. 378-423.
- [9] *Alan M.* // Int. J. Quant. Chem. 1987. Vol. 31. N 1. P. 161-172.
- [10] *Клутье П., Санше Л.* // ПНИ. 1989. № 6. С. 34-41.
- [11] *Herlt H.J., Feder R., Meister G., Bauer E.G.* // Sol. St. Comun. 1981. Vol. 38. P. 973-976.
- [12] *Рой Д.* // ПНИ. 1972. № 3. С. 184-191.
- [13] *Мак-Миллан, Мур* // ПНИ. 1980. № 7. С. 84-91.
- [14] *Шимони К.* Физическая электроника. М.: Энергия, 1977. 608 с.
- [15] Математический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1988. 847 с.

Институт ядерных исследований
Ужгородское отделение

Поступило в Редакцию
30 июня 1992 г.