ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ПРОТОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

Б. В. МАРЬИН, Л. С. НОВИКОВ, А. Г. ПОЛАНДОВ, М. В. ТЕЛЬЦОВ

На протонном ускорителе при энергиях 10.-:-.80 кэв исследованы характеристики спиральных канальных электронных умиожителей (КЭУ) типа ВЭУ-6, выпускаемых промышленностью. Изучены формы амплитудных распределений выходного заряда КЭУ при разных напряжениях питания и измерен коэффициент усиления КЭУ; его величина составляет, в среднем, 5.107.-:-1.108. Определена абсолютная эффективность регистрации протонов с помощью КЭУ. В указанном диапазоне энергий она изменяется от 0,81 до 0,92. Получены кривые относительного изменения коэффициента усиления КЭУ и эффективности регистрации при перемещении точечного пучка по диаметру входной воронки КЭУ и кривые пропускания электростатического анализатора при различных энергиях протонов. Полоса пропускания анализатора ~ 3% для центрального оссвого пучка.

В работе [1] при регистрации протонов с энергиями от 20 до 100 кэв кремниевыми поверхностно-барьерными детекторами получено энергетическое разрешение ~ 7 кэв. Детекторы с таким разрешением позволяют успешно проводить многие эксперименты по изучению рассеяния протонов на кристаллических структурах. Однако имеется широкий круг задач, связанных с исследованием поверхностных свойств кристаллов, для решения которых необходимо иметь разрешение ~ 0,5÷1,5 кэв в указанном диапазоне энергий и в диапазоне энергий меньше 20 кэв [2]. Эти задачи могут быть решены с помощью спектрометра, в котором селекция частиц по энергии осуществляется электростатическим анализатором с отклоняющим полем [3], а регистрация частиц производится детектором открытого типа канальным электронным умножителем (КЭУ) [4].

В настоящей работе приведены результаты испытаний такого спектрометра на протонном ускорителе [5] при энергиях от 10 до 80 кэв. Основное внимание уделено исследованию характеристик канальных электронных умножителей, которые пока сравнительно мало изучены, в особенности при регистрации тяжелых частиц, и существенным образом зависят от геометрии и технологии изготовления КЭУ. В спектрометре использовался цилиндрический электростатический анализатор со следующими параметрами: средний радиус $R_0 = 80$ мм, расстояние между пластинами d = 4 мм, центральный угол $\theta = 90^{\circ}$, постоянная анализатора $C_a = 0,1$ кв/квв, входная щель имела размеры 10×1 мм², расчетная полоса пропускания для широкого изотропного пучка составляла 9%, а для центрального осевого пучка — 5%.

На ускорителе были сняты кривые пропускания анализатора для центрального осевого пучка при разных энергиях протонов. Эти кривые в относительных единицах приведены на рис. 1. Видно, что определенная экспериментально полоса пропускания составляет ~ 3,1%, т. е. энергетическое разрешение, обеспечиваемое анализатором, оказалось несколько выше расчетного. Дальнейшее сужение полосы пропускания анализатора возможно за счет уменьшения размеров входной щели. При ширине щели 0,2 ÷ 0,3 мм в случае центрального осевого пучка использовавшийся анализатор обеспечивает разрешение ~ 1%.



Рис. 1. Кривые пропускания электростатического анализатора для центрального осевого пучка.

Для регистрации протонов применялись канальные электронные умножители типа ВЭУ-6, выпускаемые промышленностью [6]. Умножитель ВЭУ-6 — спирального типа с входной воронкой диаметром 8 мм и углом раствора 90° — изготовлен из свинцово-силикатного стекла. Эмиттирующий слой образован восстановлением стекла в водороде при прогреве. Сопротивление канала составляет около 5 · 10⁸ ом.

Схема эксперимента по исследованию КЭУ показана на рис. 2. Узкий коллимированный пучок протонов (диаметр пучка ~ 0,3 мм) падал на



Рис. 2. Схема исследования КЭУ: К — коллиматор, У — усилитель, А — многоканальный амплитудный анализатор.

входную воронку КЭУ. Канальный умножитель мог перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях и поворачиваться относительно пучка на угол ± 45°. Импульсы с нагрузочного сопротивления КЭУ усиливались и поступали на многоканальный амплитудный анализатор. На рис. З приведены амплитудные распределения выходного заряда КЭУ, полученные при регистрации протонов с энергией 20 кэв при различных значениях напряжения питания $(+U_n)$. Видно, что при напряжении питания 1,8 кв амплитудное распределение имеет вид, близкий к экспоненциальному. При напряжении питания 2,0 кв в распределении появляется



Рис. 3. Амплитудные распределения выходлого заряда КЭУ при разных злачениях напряжения питания; М — коэффициент усиления КЭУ.

максимум, который формируется и смещается вправо при дальнейшем повышении напряжения. Формирование пика в амплитудном распределении обусловлено увеличением пространственного заряда вблизи выходного конца канала и поверхностного заряда на стенках КЭУ, это — так называемый режим насыщения КЭУ.

В случае распределения заряда, близкого к экспоненциальному (ненасыщенный КЭУ), средний коэффициент усиления КЭУ есть $M = Q\bar{/}q$, где \bar{Q} — амплитуда импульса, выраженная в единицах заряда, при которой скорость счета выходных импульсов падает в е раз по сравнению со скоростью счета импульсов с зарядом, равным нулю. Простой метод определения коэффициента усиления для этого случая описан в [7]. При наличии максимума в амплитудном распределении величина \bar{Q} соответствует наиболее вероятной амплитуде в пике. Для умножителей ВЭУ-6, как видно из рис. 3, $M = 5 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^8$.

Коэффициент усиления КЭУ не остается постоянным при попаданик пучка в разные точки входной воронки, что необходимо учитывать при установке КЭУ относительно выходного отверстия электростатического анализатора и при интерпретации результатов измерений. На рис. 4 показано относительное изменение коэффициента усиления при перемещении пучка по диаметру входной воронки. По оси абсцисс отложено расстояние от центра воронки в мм. Пучок падал под углом 45° к поверхности воронки. Кривая снималась при напряжении 3,4 кв, что обеспечивало сохранение режима насыщения КЭУ во всех точках. Провал усиления в центре воронки объясняется сокращением эффективной длины канала при попадании пучка непосредственно в спираль КЭУ.

Вторым важным параметром КЭУ является эффективность регистрации частиц, определяемая отношением числа зарегистрированных импульсов КЭУ к числу попавших на его входную воронку частиц. Измерение абсолютной эффективности является наиболее сложной задачей при исследовании КЭУ. Так как максимально допустимая скорость очета КЭУ не превышает 5.10⁴ имп/сек, используемая обычно методика измерения входного потока частиц с помощью цилиндра Фарадея дает погрешность ~ 15÷20%.

В настоящей работе при измерении эффективности КЭУ в области энергий 40÷80 кэв входной поток определялся путем дискретного счета протонов полупроводниковым детектором [1]. Исследуемый КЭУ и полупроводниковый дстектор, имеющие одинаковую входную диафрагму, попеременно помещались под пучок и облучались одинаковой дозой протонов, которая контролировалась по показаниям мониторного счетчика. Абсолютная эффективность КЭУ определялась как отношение результатов двух измерений. Погрешность измерения эффективности в данном случае обусловлена, в основном, нестабильностью интенсивности и пространственного положения пучка ускорителя и не превышает 5%.

При энергиях ниже 40 кэв абсолютная эффективность определялась расчетным путем на основании исследования формы амплитудных распределений выходного заряда КЭУ. Рассматривая процесс умножения в канале электронного умножителя как марковский процесс, непрерывный во времени и дискретный в пространстве [8], можно показать, что амплитудное распределение выходного заряда ненасыщенного КЭУ отвечаег следующему соотношению:

$$\varphi(x) = abe^{-b}e^{-ax}\frac{\int_1(2\sqrt{abx})}{\sqrt{abx}}, \qquad (1)$$

где α — постоянный параметр, определяемый напряжением питания КЭУ; b — математическое ожидание вторичных эмиссионных электронов, возникающих в результате соударения первичной частицы с воронкой КЭУ, J₁ — модифицированная функция Бесселя первого порядка.

Параметр в связан с эффективностью КЭУ соотношением

$$\varepsilon = 1 - e^{-b}.$$

Следовательно задача определення эффективности сводится к нахождению из экспериментальных данных параметра b. Для этого удобно переписать (1) в виде $\varphi(x)/\alpha = f(x/\alpha)$. Кривые этой функции, рассчитанные при изменении значения параметра b от 4,0 до 0,5, приведены на рис. 5a. Их вид хорошо согласуется с экспериментальными кривыми амплитудных распределений выходного заряда ненасыщенного КЭУ, снятыми при различных значениях энергии первичных частиц (рис. 56). В связи с тем, что в исследуемом диапазоне энергий протонов (10÷80 кэв) параметр b меняется незначительно, для наглядности экспериментальные кривые сняты



Рис. 4. Относительное изменение коэффициента усиления КЭУ при перемещении пучка по диаметру входной воронки.



Рис. 5. Рассчитанные теоретически (а) и снятые экспериментально (б) амплитудные распределения выходного заряда ненасыщенного КЭУ.

при облучении КЭУ электронами в диапазоне энергий 0,05÷10 кэв, т. е. в той области, где параметр b изменяется существенно.

Произведение среднего усиления КЭУ (среднего числа электронов на выходе канала $\bar{x} = b/\alpha$) на значение функции $\phi(x)$ в этой точке есть монотонно-возрастающая функция

$$\xi(b) = be^{-2b} f_1(2b),$$
 (3)

зависящая только от b. Таким образом, определив любым из известных способов математическое ожидание b/a по экспериментальной кривой

140

амплитудного распределения ненасыщенного КЭУ, можно найти значение функции $\xi(b)$ и далее с помощью (2) и (3) определить параметр b и эффективность ε .

Погрешность нахождения эффективности описаным методом определяется статистической ошибкой измерений и ошибкой, связанной с аппроксимацией начального участка амплитудного распределения, который не регистрируется анализатором. В проведенных измерениях суммарная ошибка составляла 2:3%. В таблице приведены значения эффективности реги-

Энергия протонов (кэв)	Эффективность регистрации	
	расчетный метод	измерение с помощью ППД
10 20 30 40 50 60 80	0,81 0,86 0,85 0,85 0,92 0,87 0,86	 0,91 0,88 0,86 0,85

страции протонов, найденные расчетным методом для всего диапазона энергий 10 ÷ 80 кэв, и значения эффективности, измеренные с помощью полупроводникового детектора для энергий протонов 40 ÷ 80 кэв. Результаты, полученные двумя различными методами, хорошо согласуются.

На рис. 6 показано относительное изменение эффективности регистрации при перемещении пучка по диаметру входной воронки КЭУ. Условия



Рис. 6. Относительное изменение эффективности регистрации при перемещении пучка по диаметру входной воронки; пунктирная кривая получена при наличии сетки на входе КЭУ.

эксперимента были такие же, как при измерении относительного изменения коэффициента усиления (рис. 4). Сплошная кривая получена для КЭУ без входной сетки, пунктиром показана кривая при наличии входной сетки.

141

Минимумы на пунктирной кривой соответствуют попаданию пучка на рамки сетки.

Резюмируч изложенное можно отметить, что испытанный спектрометр обладает достаточно высоким энергетическим разрешением, что позволяет использовать его в экспериментах по изучению поверхностных свойств кристаллов при энергиях протонов 10 ÷ 80 кэв. Канальные электронные умножители ВЭУ-6 регистрируют протоны в указанном энергетическом диапазоне с эффективностью, близкой к единице. Полученные характеристики КЭУ позволяют выбрать оптимальную конструкцию спектрометра и режим его работы для конкретных условий эксперимента.

ниияф мгу

Поступила 15.11.1977

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Т. Я. Белоусова и др. Геомагнетным и аэрономия, 15, 24 (1975).
- 2. В. А. Архипович и др. Труды IV Всесоюзного совещания по физике взаимодействий заряженных частиц с монокристаллами, М., 1973.
- 3. G. C. Theodoridis, F. R. Paolini. Rev. Scient. Instr., 39, 326 (1958).
- 4. D. S. Evans. Rev. Scient. Instr., 36, 375 (1965).
- 5. А. Г. Поландов. Изв. АН АрмССР, Физика, 5, 129 (1970).
- 6. М. Р. Айнбунд, В. Г. Коваленко, Б. В. Поленов. ПТЭ, № 4, 154 (1974).
- 7. Б. В. Марьин, М. В. Тельцов. ПТЭ, № 1, 164 (1976).
- 8. В. Феллер. Введение в теорию вероятностей и се приложения, Изд. Мир. М., 1967, т. 2.

ԽՈՂՈՎԱԿԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ԲԱԶՄԱՊԱՏԿԻՉՆԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ ՓՈՔՐ ԷՆԵՐԳԻԱՅՈՎ ՕԺՏՎԱԾ ՊՐՈՏՈՆՆԵՐԻ ԳՐԱՆՑՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

P. 4. ՄԱՐՏԻՆ, Լ. Ս. ՆՈՎԻԿՈՎ, Ա. Գ. ՊՈԼԱՆԴՈՎ, Մ. 4. SHL8N4

Գրոսոնային արագացուցիչի վրա, պրոտոնների 10 - 80 կէվ Լներգիաների դեպրում ուսումնասիրված են BOV-6 տիպի պարուրակային խողովակային էլեկտրոնային բաղմապատկիլների ղանաղան բնութագրերը։

INVESTIGATION OF CHANNEL ELECTRON MULTIPLIERS CHARACTERISTICS AT THE DETECTION OF LOW ENERGY PROTONS

B. V. MAR'IN, L. S. NOVIKOV, A. G. POLANDOV, M. V. TEL'TSOV

The characteristics of VEU-6 type helical channel electron multipliers were investigated on the proton accelerator at 10; 30 kev. The shapes of pulse height distributions were studied at different supply voltages and the absolute efficiency of the multiplier for the detection of 10; 80 kev protons was determined.

142