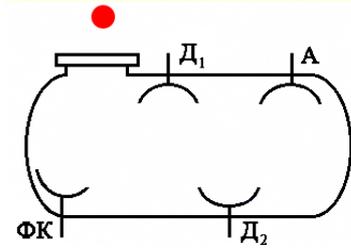


## 1.4 Фотоэлектронные умножители

**Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)** — электровакуумный прибор, в котором поток электронов, эмитируемый фотокатодом под действием оптического излучения (фототок), усиливается в умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии; ток в цепи анода (коллектора вторичных электронов) значительно превышает первоначальный фототок (обычно в  $10^5$  раз и выше). Впервые был предложен и разработан Л. А. Кубецким в 1930–34.



Для счёта сцинтилляций обычно используются два типа фотоумножителей: с круговой электростатической фокусировкой и линейные электростатические без фокусировки. В умножителях первого типа диноды расположены по кругу; они представляют собой пластины, выгнутые в форме корыт. Другой тип ФЭУ имеет ряд параллельных динодов, состоящих из узких твёрдых активированных полос, расположенных в форме жалюзи.

Рис. 7. Внешний вид ФЭУ.

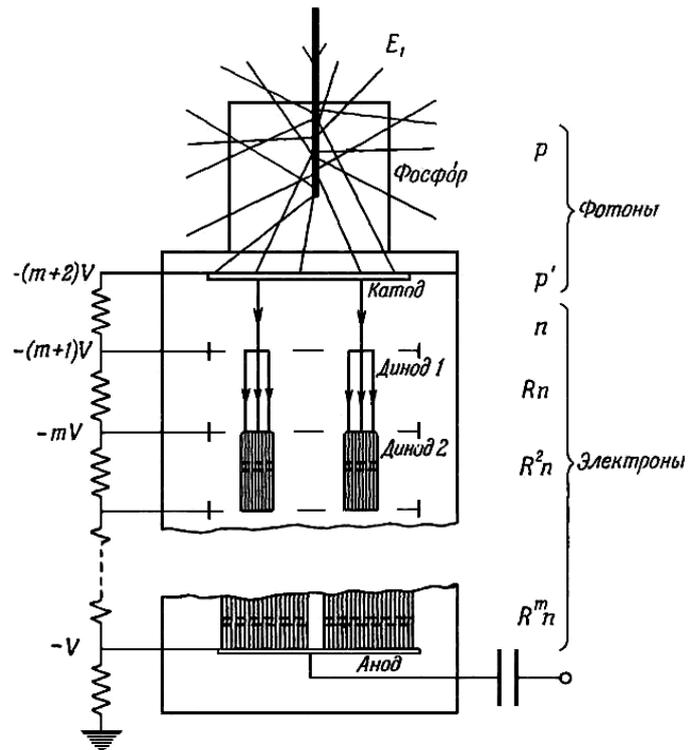


Фотоны, возникшие в сцинтиляторе под действием заряженной частицы, по светопроводу достигают ФЭУ и через его стеклянную стенку попадают на фотокатод. ФЭУ представляет собой баллон, внутри которого в вакууме располагается фотокатод и система последовательных динодов, находящихся под положительным увеличивающимся от динода к диноду электрическим потенциалом.

Рис. 8. Схема, иллюстрирующая принцип действия

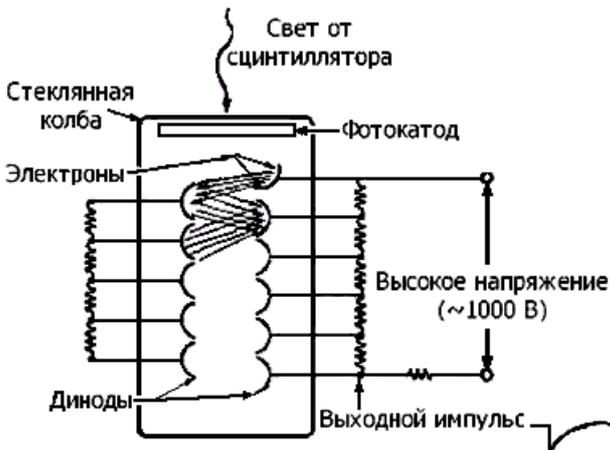
сцинтилляционного счётчика с фотоумножителем.

Для целей спектрометрии ядерных излучений фотокатод обычно располагается на внутренней поверхности плоской торцевой части баллона ФЭУ. В качестве материала фотокатода выбирается вещество достаточно чувствительное к свету, испускаемому сцинтилляторами. Наибольшее распространение получили сурьмяно-цезиевые фотокатоды, максимум спектральной чувствительности которых лежит при  $\lambda = 3900, 4200 \text{ \AA}$ , что соответствует максимумам спектров люминесценции многих сцинтилляторов. Одной из характеристик фотокатода является его квантовый выход  $\eta$ , т. е. вероятность вырывания фотоэлектрона фотоном, попавшим на фотокатод. Величина  $\eta$  может достигать 10–20%. Свойства фотокатода характеризуются также



интегральной чувствительностью, представляющей собой отношение фототока ( $\text{мкА}$ ) к падающему на фотокатод световому потоку ( $\text{лм}$ ).

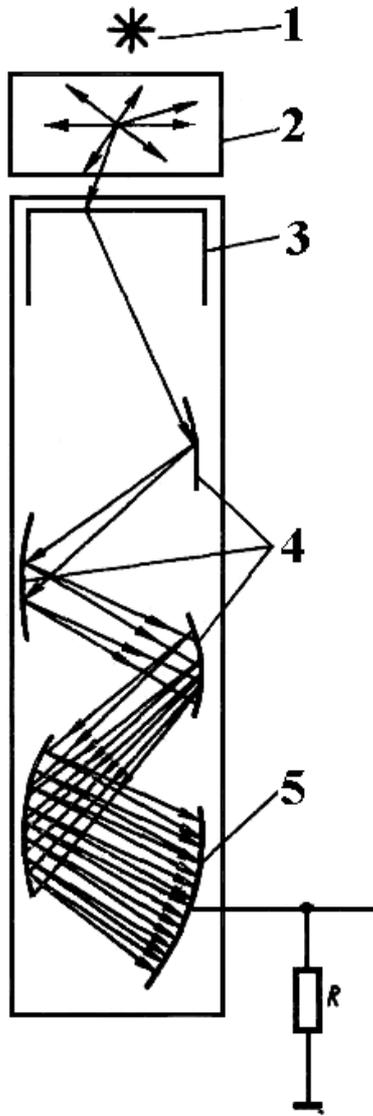
Рис. 9. Устройство ФЭУ.



толщина фотокатода. Существенно также обеспечить равномерную толщину фотокатода, чтобы его чувствительность была одинакова на всей площади. В сцинтилляционной  $\gamma$ -спектрометрии часто необходимо использовать твердые сцинтилляторы больших размеров, как по толщине, так и по диаметру. Поэтому возникает необходимость изготавливать ФЭУ с большими диаметрами фотокатодов. В отечественных ФЭУ

фотокатоды делаются с диаметром от нескольких сантиметров до 15,20 см. фотоэлектроны, выбитые из фотокатода, должны быть сфокусированы на первый умножительный электрод. Для этой цели используется система электростатических линз, которые представляют собой ряд фокусирующих диафрагм. Для получения хороших временных характеристик ФЭУ важно создать такую фокусирующую систему, чтобы электроны попадали на первый динод с минимальным временным разбросом.

На Рис. 4 приведено схематическое устройство фотоэлектронного умножителя. Высокое напряжение, питающее ФЭУ, отрицательным полюсом присоединяется к катоду и распределяется между всеми электродами. Разность потенциалов между катодом и диафрагмой обеспечивает фокусировку фотоэлектронов на первый умножающий электрод. Умножающие электроды носят название динодов. Диноды изготавливаются из материалов, коэффициент вторичной эмиссии которых больше единицы ( $s > 1$ ). В



отечественных ФЭУ диноды изготавливаются либо в виде корытообразной формы (Рис. 10), либо в виде жалюзи. В обоих случаях диноды располагаются в линию. Возможно также и кольцообразное расположение динодов. ФЭУ с кольцообразной системой динодов обладают лучшими временными характеристиками. Эмитирующим слоем динодов является слой из сурьмы и цезия или слой из специальных сплавов. Максимальное значение  $s$  для сурьмяно-цезиевых эмиттеров достигается при энергии электронов 350-400 эВ, а для сплавных эмиттеров - при 500-550 эВ. В первом случае  $s = 12, 14$ , во втором  $s = 7, 10$ . В рабочих режимах ФЭУ значение  $s$  несколько меньше. Достаточно хорошим коэффициентом вторичной эмиссии является  $s = 5$ .

Фотоэлектроны, сфокусированные на первый динод, выбивают из него вторичные электроны. Число электронов, покидающих первый динод, в несколько раз больше числа фотоэлектронов. Все они направляются на второй динод, где также выбивают вторичные электроны и т. д., от динода к диноду, число электронов увеличивается в  $s$  раз.

**Рис. 10.** Схема умножения потоков электронов в ФЭУ: 1 – источник ядерного излучения; 2 – фосфор; 3 – фотокатод ФЭУ; 4 – диноды; 5 – анод.

При прохождении всей системы динодов поток электронов возрастает на 5-7 порядков и попадает на анод - собирающий электрод ФЭУ. Если ФЭУ работает в токовом режиме, то в цепь анода включаются приборы, усиливающие и измеряющие ток. При регистрации ядерных излучений обычно необходимо измерять число импульсов, возникающих под воздействием ионизирующих частиц, а также амплитуду этих импульсов. В этих случаях в цепь анода включается сопротивление, на котором и возникает импульс напряжения.

В результате фотоэффекта из фотокатода вылетают электроны, которые затем, ускоряясь в электрическом поле, направляются на систему динодов, где за счет вторичной (ударной) электронной эмиссии образуют нарастающую от динода к диноду электронную лавину, поступающую на анод. Обычно

коэффициент усиления ФЭУ (число электронов, достигших анода при выбивании из фотокатода одного электрона) составляет  $10^5$ - $10^6$ , но может достигать и  $10^9$ , что позволяет получить на выходе ФЭУ легко регистрируемый электрический импульс. Временное разрешение ФЭУ составляет  $10^{-8}$ - $10^{-9}$  с.

ФЭУ, предназначенные для сцинтилляционного счётчика, должны обладать высокой эффективностью фотокатода (до 2,5%), высоким коэффициентом усиления ( $10^8$ — $10^8$ ), малым временем собирания электронов ( $\sim 10^{-8}$  сек) при высокой стабильности этого времени. Последнее позволяет достичь разрешающей способности по времени порядка  $10^{-9}$  сек. Высокий коэффициент усиления ФЭУ наряду с малым уровнем собственных шумов делает возможной регистрацию отдельных электронов, выбитых с фотокатода. Сигнал на аноде ФЭУ может достигать 100 В.

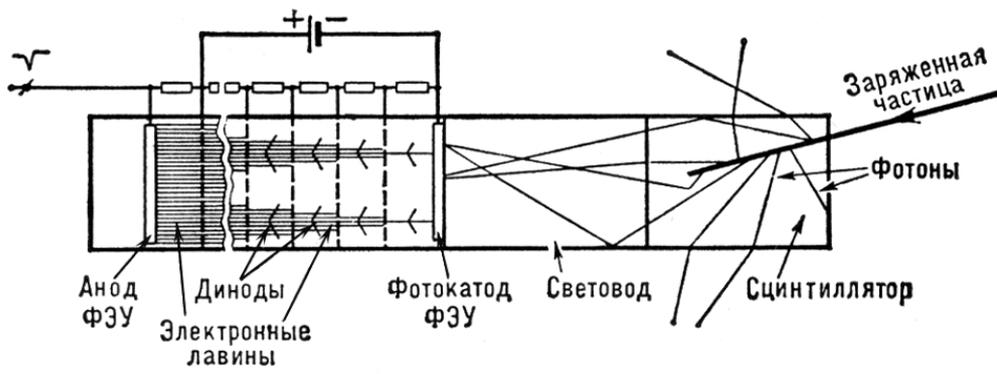


Рис. 11. Схема сцинтиляционного счётчика: каты света (фотоны) «выбивают» электроны с фотокатода; двигаясь от динода к диноду, электронная лавина размножается.

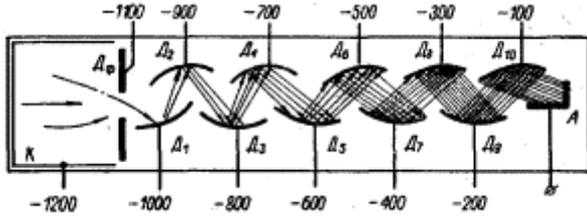


Рис. 12. Принципиальная схема ФЭУ.

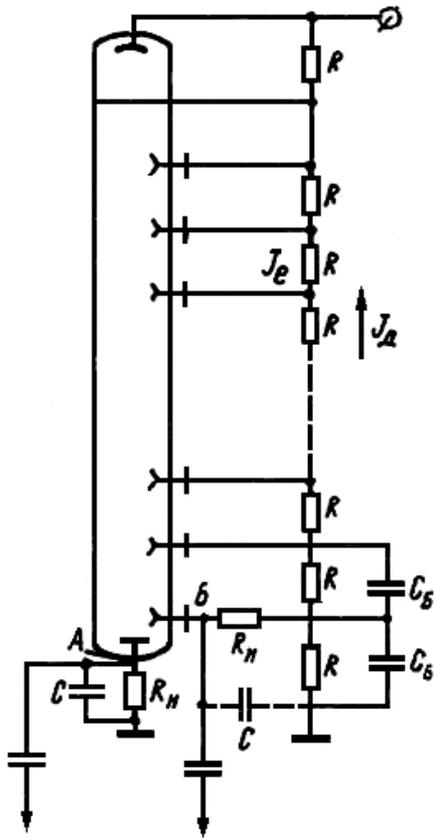


Рис. 13. Электрическая схема ФЭУ.