

2.7. Фотоэлектронный умножитель

2.7. Фотоэлектронный умножитель	1
2.7.1 Устройство и основные узлы фотоэлектронного умножителя	1
Фотокатод	2
Катодная камера	2
Диодная система	3
Анодный блок	6
2.7.2 Принцип работы и режимы использования ФЭУ	6
Форма сигнала на выходе ФЭУ	7
Режим счета одноэлектронных импульсов	9
Режим постоянного тока	10
Режим счета многоэлектронных импульсов	10
Питание ФЭУ	11
2.7.3 Характеристики ФЭУ	12
Спектральная характеристика	12
Анодная чувствительность и коэффициент усиления	14
Темновой ток, шум, пороговая чувствительность, обнаружительная способность	14
Открытые электронные умножители (ВЭУ) и микроканальные умножительные пластины (МКП)	18

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) — очень распространенный и во многих случаях незаменимый детектор излучения. Он позволяет регистрировать и предельно слабые и довольно интенсивные потоки. От единиц до $10^{10} \dots 10^{12}$ фотонов в секунду. Постоянная времени — порядка $10^{-8} \dots 10^{-10}$ с, т.е. допускает весьма высокие частоты модуляции. Может быть размещен на воздухе и в вакууме. На выходе дает легко измеримый сигнал. Все это с лихвой компенсирует неудобства, связанные с необходимостью использования высоковольтных блоков питания (0.5...2.5 кВ) и довольно большими габаритами ФЭУ.

2.7.1 Устройство и основные узлы фотоэлектронного умножителя

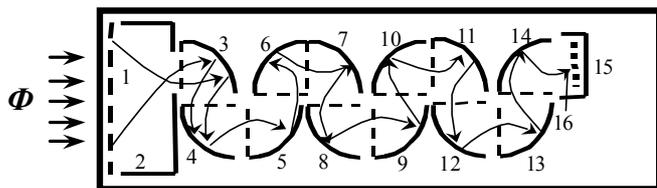


Рис. 2.7.1

Схематическое изображение устройства ФЭУ. Пояснения в тексте.

Схема ФЭУ приведена на рис. 2.7.1 (этот и некоторые другие рисунки воспроизведены из [1]). Фотоэлектронный умножитель состоит из фотокатода 1, катодной камеры 1–3, диодной системы 3–14 и анодного узла 14–16, размещенных внутри вакуумного объема. Световой поток Φ поглощается фотокатодом, эмиттирующим в вакуум электроны. В электростатическом поле, создаваемом электродами катодной камеры, электроны ускоряются и фокусируются на первый диод (3). Ускоренный первичный электрон способен

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

выбиты с поверхности несколько вторичных, медленных¹. Умноженные на первом диноде, вторичные электроны ускоряются и фокусируются на второй динод... Далее этот процесс повторяется на всех каскадах и с последнего динода усиленный электронный поток собирается анодом. Каждый динод работает и анодом, собирая электроны с предыдущего, и катодом, эмиттируя усиленный поток. Отсюда и название — *динод*.

Фотокатод

Конструкция каждого ФЭУ должна обеспечить оптимальные условия попадания светового излучения на фотокатод (оптический вход ФЭУ), поэтому применяются различные геометрические расположения фотокатода относительно оси вакуумной колбы и различные материалы входных окон.

Для регистрации *несфокусированного* излучения используется торцевой оптический вход, изображенный на рис. 2.7.1. В этом случае **ПОЛУПРОЗРАЧНЫЙ ФОТОКАТОД**, работающий “на просвет” (излучение попадает на фотокатод со стороны подложки), формируется при изготовлении в виде тонкой пленки непосредственно на плоском входном окне. Диаметр фотокатода может превышать 250 мм, но наиболее широко применяются ФЭУ с диаметрами рабочей площади от 5 до 50 мм.

Сфокусированные световые пучки можно регистрировать и с фотокатодом малой площади, в том числе — работающим “на отражение” (излучение попадает на фотокатод со стороны вакуума). Входное окно при этом располагается или на торце, или на боковой стенке колбы.

В этом случае мы имеем **МАССИВНЫЙ ФОТОКАТОД**, формируемый на *металлической*, т.е. хорошо проводящей поверхности. Он имеет существенные преимущества перед *полупрозрачным* и по эмиссионным свойствам и, главное, по электрическим. Дело в том, что материал фотокатода — полупроводник с невысокой и сильно зависящей от температуры проводимостью. Электрод к *полупрозрачному фотокатоду* может быть подведен только по периферии, так что при больших интенсивностях света и соответственно больших токах эмиссии проводимость *вдоль* тонкой пленки от периферии к центру может оказаться недостаточной, особенно если фотокатод придется охлаждать для уменьшения темнового тока. В *массивном фотокатод*е ток от металлического электрода к поверхности течет не *вдоль*, а *поперек* слоя и ограничений по величине фототока практически не возникает.

Катодная камера

Катодная камера ФЭУ образуется поверхностями фотокатода и первого динода, а также расположенными между ними электродами, форма и распределение потенциалов на которых определяют ее электронно-оптические свойства. У неё две функции: вытягивание электронов с фотокатода и фокусировка их на первый динод. Отсюда и характеристические параметры.

¹ Отношение числа вторичных электронов к числу первичных называется *коэффициентом вторичной эмиссии* и обычно обозначается буквой σ .

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ, т.е. коэффициент сбора электронов с фотокатода на первый динод.

ОСТРОТА ФОКУСИРОВКИ, определяющая допустимое отношение рабочих площадей фотокатода и первого динода.

РАЗБРОС ВРЕМЕН ПРОЛЕТА ЭЛЕКТРОНОВ, вылетающих с различных точек фотокатода. Он приводит к неопределенности времени задержки импульса на выходе ФЭУ относительно момента поглощения фотона и определяет временную ширину многоэлектронного импульса, см. раздел 2.7.2.

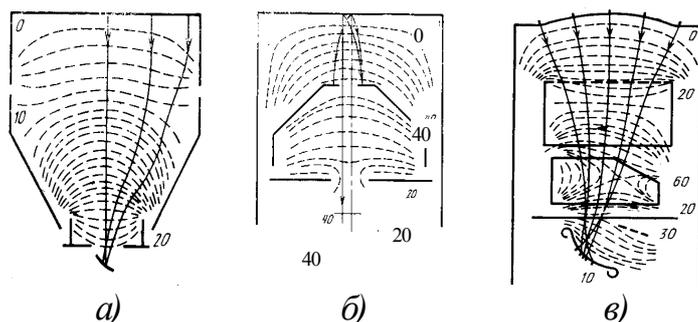


Рис. 2.7.2..

Некоторые варианты электроннооптических систем для ФЭУ с торцевым входом.

Числа у электродов — потенциалы.

На рис. 2.7.2 показаны три типа катодных камер ФЭУ с торцевым входом (и полупрозрачным фотокатодом). Ради улучшения эффективности сбора фотоэлектронов и, главное, ради уменьшения разброса времен их пролета из разных точек фотокатода, иногда приходится собирать довольно сложные электроннооптические системы, как у ФЭУ-87 (рис. 2.7.2,в).

Динодная система

Материал динода и энергия падающих на него электронов определяют только коэффициент вторичной эмиссии. Кроме него, умножительные свойства каждого каскада и динодной системы в целом зависят и от следующих параметров, чувствительных к конструкции системы:

ЭФФЕКТИВНОСТЬ, т.е. отношение величины усиления динода к коэффициенту вторичной эмиссии применяемого материала. Эффективность может быть меньше единицы из-за возможного выталкивания электронов объемным зарядом за пределы динода-мишени. В *жалюзийных системах* возможен также прямой пролет электронов минуя ближайший динод на следующий.

РАЗБРОС ВРЕМЕН ПРОЛЕТА ЭЛЕКТРОНОВ на каскад, определяющий быстродействие системы — ширину одноэлектронного импульса на выходе ФЭУ.

ВЕЛИЧИНА ГРАДИЕНТА ПОТЕНЦИАЛА у эмиттирующей поверхности, от которой зависят и быстродействие, и линейность световой характеристики. Нелинейность возникает на последних каскадах, где велики плотности тока. При малом градиенте потенциала медленные вторичные электроны могут создать

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

объемный заряд у поверхности эмиттирующего динода, достаточный для того, чтобы часть электронов вернулась на динод¹.

ОСТРОТА ФОКУСИРОВКИ, определяющая критичность выполнения заданных геометрических размеров и распределения потенциалов на электродах.

РАБОЧАЯ ПЛОЩАДЬ, определяющая токоустойчивость и постоянство характеристик в широком диапазоне интенсивностей, а значит, и величин токов на динодах.

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ в динодной системе, возникающая при переносе возбуждения в сторону фотокатода.

Обратная связь может возникать вследствие *ионизации* молекул остаточных газов либо *возбуждения люминесценции* поверхностей или остаточных газов электронным ударом. Положительный ион вытягивается полем в сторону, противоположную электронному потоку и, упав на динод, выбивает из него электроны, включающиеся в общий поток. Генерируемый квант люминесценции также может поглотиться и создать дополнительный “затравочный” фотоэлектрон где-нибудь близ первого динода.

Конструкции динодных систем бывают различны. В основном, в выпускаемых промышленно ФЭУ используются *коробчатые* системы, *жалюзийные*, *корытообразные*. Реже — *системы с непрерывным динодом*.

В КОРОБЧАТОЙ СИСТЕМЕ (рис. 2.7.3а,б) динод представляет собой часть поверхности цилиндра (в сечении обычно 1/4 окружности), закрытую с торцов крышками. Эта система характеризуется неострой фокусировкой электронов, малой напряженностью электрического поля у поверхности динода и малой величиной его рабочей площади.

Достоинства коробчатой системы — высокая эффективность каскада (~95%) при использовании различных типов вторично-эмиссионных поверхностей (SbCs и BeO на CuBe), жесткость формы динода, почти полная экранировка пролетных промежутков от влияния крепежных изоляторов, компактность. Широко применяется при создании малошумящих механически устойчивых ФЭУ.

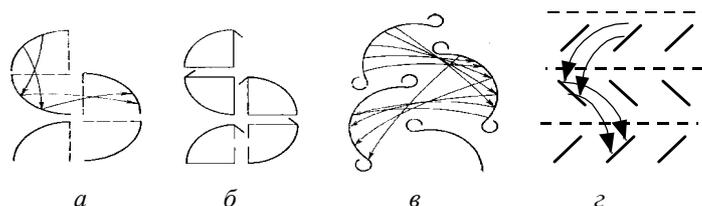


Рис. 2.7.3.

Динодные системы
ФЭУ.

Пояснения в тексте.

КОРЫТООБРАЗНЫЕ ДИНОДЫ (рис. 2.7.3,в) — почти то же самое, что и коробчатые, но у них нет боковых стенок, а форма поверхности динода обеспечивает нужную фокусировку электронов. В системах с острой фокусировкой используются различные варианты корытообразных динодов. Например, тороидальные диноды, представляющие собой поверхности тела вращения этого профиля.

¹ Так же и в вакуумном диоде, кенотроне. Для полного сбора на анод термоэлектронов, испущенных катодом, т.е. насыщения анодного тока, требуются анодные напряжения порядка ста вольт.

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

ЖАЛЮЗИЙНАЯ СИСТЕМА (рис. 2.7.3,2) имеет диоды, состоящие из наклонных полосок — лопастей жалюзи, являющихся эмиттерами вторичных электронов, и прозрачной сетки, находящейся под тем же потенциалом. Сетка экранирует жалюзи от тормозящего поля предыдущего диода, обеспечивая попадание вторичных электронов на лопасти следующего диода. У такой системы рабочая площадь диода относительно велика, а междиодное расстояние может быть сделано достаточно малым. Электрическое поле между жалюзийными диодами является приблизительно однородным. При переходе с каскада на каскад по мере увеличения числа и плотности электронов в пачке происходит ее расширение из-за взаимного расталкивания электронов. Жалюзийная система характеризуется неострой фокусировкой и не препятствует этому расширению, что увеличивает площадь диода, по которой распределяется электронный поток, и обеспечивает устойчивость сигнала ФЭУ при больших токовых нагрузках. В то же время, напряженность электрического поля у поверхности диода велика и это позволяет довести разброс времен пролета электронов между двумя каскадами до величин менее 1 нс.

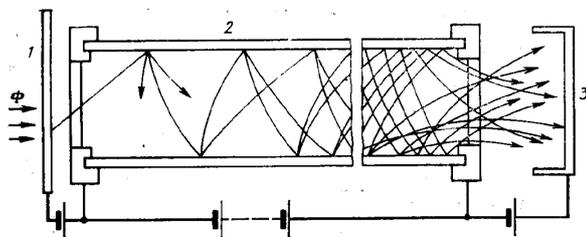


Рис. 2.7.4

Фотоэлектронный умножитель, состоящий из полупрозрачного фотокатода (1), электронного умножителя с непрерывным диодом (2) и коллектора (3).

Недостатком жалюзийной системы является возможность пролета электронов через диод без умножения, т.е. невысокая эффективность диодного каскада. Эта же причина ухудшает и временное разрешение.

Большие возможности для миниатюризации ФЭУ и систем с их применением представляются при использовании **НЕПРЕРЫВНОГО ДИОДА** с распределенным сопротивлением. В этой системе нет отдельных диодов. Умножение электронного потока происходит при его движении внутри замкнутого объема (например — трубки, см. рис. 2.7.4), ограниченного поверхностью с хорошей вторичноэмиссионной способностью. Если внутренние стенки трубки покрыты полупроводящим слоем и к торцам ее приложена разность потенциалов, то внутри мы получим продольное ускоряющее поле. Точки соударений электронов со стенкой случайны, но при правильном выборе соотношения диаметра и длины (примерно 1:50) свойства умножителя получаются прекрасными. На таких системах могут быть построены “микроканальные пластины”, представляющие собой пластинку, испещренную каналами диаметром в 10—20 мкм, с шагом 20—40 мкм, т.е. имеющую 1000—2000 миниатюрных умножителей на 1 мм². Торцы пластины металлизуются, и к ним подводятся рабочие потенциалы, одновременно ко всем каналам. Толщина пластины 0,5—2 мм. Коэффициент усиления может достигать 10⁷—10⁸.

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

Анодный блок

Обычно анодный блок состоит из последнего динода и коллектора (анода). От конструкции анодного блока зависит величина линейного участка световой характеристики, быстродействие ФЭУ и возможность правильного согласования с последующей радиотехнической цепью. Эти задачи конструкторы решают достаточно успешно, так что не приходится выбирать ФЭУ по способу построения анодного блока. Можно считать, что параметры ФЭУ определяются только типами фотокатодов и динодных систем.

2.7.2 Принцип работы и режимы использования ФЭУ

Фотоэлектронный умножитель — электровакуумный прибор, преобразующий поток падающего на него излучения (в ультрафиолетовой, видимой, ближней инфракрасной областях спектра) в электронный поток в вакууме, с последующим его усилением. При этом существенно, что усиление электронного потока происходит в процессе вторичноэлектронной эмиссии. Шумовые характеристики такого усилителя много лучше, чем у любого твердотельного (в котором преобразуются электронные потоки *внутри* твердого тела), ибо каждый акт появления в потоке нового электрона требует преодоления энергетического барьера, много превышающего kT . Энергия связи электронов в твердом теле (термоэлектронная работа выхода) обычно превышает 4 эВ. Для фотокатодов ФЭУ, работающих в длинноволновой области, разработаны специальные сложные системы с предельно малой работой выхода, порядка 1 эВ. Но и это много больше kT , равного при комнатной температуре ~ 0.025 эВ.

Эмиссия электронов в вакуум может происходить либо при получении ими достаточно большой энергии возбуждения, либо при квантовомеханическом туннелировании сквозь поверхностный потенциальный барьер в сильном вытягивающем поле. Поскольку дополнительная энергия может быть получена электроном из разных источников, то и параметры ФЭУ определяются четырьмя основными видами электронной эмиссии: фотоэлектронная, электрон-электронная (или вторичноэлектронная), термоэлектронная, автоэлектронная (или “полевая”, или “холодная”).

Принцип работы ФЭУ прост: фотон выбивает из фотокатода “первичный” электрон, который ускоряется электрическим полем до 50–200 эВ и вытягивается на первый динод. Там его энергия на очень малой глубине проникновения, порядка размеров атома, целиком рассеивается на возбуждение собственных электронов материала динода, так что возникает уже несколько электронов, возбужденных не столь сильно, но способных преодолеть поверхностный потенциальный барьер и выйти в вакуум. В этом процессе, называемом вторичноэлектронной эмиссией, должна образоваться пачка из 3—5-ти и более электронов на каждый упавший, иначе работа динодной системы будет малоэффективной. Вторичные электроны, так же как и фотоэлектроны, имеют малые энергии, но междинодное поле их вытягивает, ускоряет и фокусирует на второй динод. Далее все повторяется, до анода.

В этом заключается процесс генерации *полезного сигнала* на выходе умножителя.

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

Но первичный электрон из фотокатода (и динодов) может также вылететь и без света, в результате термо- или автоэлектронной эмиссии. Их появление, никак не связанное со световым сигналом, возбуждает тот же процесс умножения и тоже дает на выходе измеримый сигнал. Имеются и другие причины, по которым на аноде может возникнуть ток. Например, ток утечки по элементам конструкции. Все они — паразитные, создающие шумовой сигнал, называемый *темновой ток* ФЭУ. В нем следует разделять три основных составляющих, по-разному зависящих от температуры и от напряжения питания: термоэмиссия, автоэмиссия (см. раздел 2.7.3.3) и токи утечки ФЭУ. Термоэмиссия из динодов не существенна по сравнению с термоэмиссией из фотокатода. У динодов и работа выхода больше, и рожденные на них электроны в среднем проходят меньший тракт усиления. Автоэмиссия, напротив, возникает чаще в динодной системе и приводит к возникновению неустойчивостей ФЭУ при больших напряжениях питания. Порог ее появления сильно зависит от качества изготовления динодной системы.

Величина темнового сигнала определяет предельную чувствительность ФЭУ. Можно измерить только такой световой поток, который дает на выходе сигнал, превышающий шум. Но оказывается, что значительная часть темнового тока имеет параметры, по которым она может быть выделена и отсеяна в усилительном устройстве. Этот вопрос крайне существенен, и невозможно обсуждать измерительные параметры ФЭУ без обсуждения метода регистрации его сигнала.

Здесь необходимо учитывать, во-первых, то, что ФЭУ является источником тока с бесконечным внутренним сопротивлением. Действительно, на анод ФЭУ приходит электронный поток, вытягиваемый с последнего динода относительно большим потенциалом, порядка 100 В и малые изменения его не влияют на величину тока. Во-вторых, существенна и временная структура полезного сигнала ФЭУ и шумов.

Форма сигнала на выходе ФЭУ

Каждый первичный фотозлектрон инициирует весь процесс умножения и, независимо от остальных, дает на выходе *пачку*, среднее число электронов в которой K определяется *коэффициентом усиления динодного каскада* σ (равен коэффициенту вторичной эмиссии, умноженному на эффективность каскада) и *количеством динодов* n : $K = \sigma^n$. Эта величина называется *коэффициентом усиления ФЭУ*. Обычно в рабочем режиме $K = 10^5 — 10^8$.

Импульс тока на аноде не может быть бесконечно узким не только потому, что при большой пространственной плотности электронов окажется существенным их расталкивание, но еще и потому, что сказывается *разброс времен пролета* электронов, идущих в динодной системе по разным траекториям. *Временная ширина пачки* из K электронов зависит от того, как выполнена вся умножительная система и в лучшем случае может составлять доли наносекунды. Обычно $\delta t \approx (1 \dots 10)$ нс. На рис. 2.7.5 приведена ожидаемая форма *одноэлектронного импульса*, выходного импульса ФЭУ, рожденного одним электроном с фотокатода. И δt , и K — величины вероятностные, так что амплитуда импульса тока довольно сильно флуктуирует. Если выходной

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

усилитель регистрирует не ток, а количество электричества в импульсе, то ширина импульса не важна, амплитуда сигнала определяется только величиной K .

На языке теории вероятностей процесс формирования пачки электронов в диодной системе описывается как дискретный марковский процесс (марковская цепь) — дискретная цепь случайных событий, в которой каждый последующий результат зависит *только* от предыдущего и является случайной величиной случайного аргумента. Действительно, количество электронов, эмиттированных n -м диодом, есть случайная величина (ζ_n), зависящая от коэффициента умножения диода (σ) и от количества ζ_{n-1} электронов, пришедших на него с предыдущего, $(n-1)$ -го. Совершенно не важно, какова предыстория возникновения этих электронов. Каждый из них, независимо от остальных, пошлет на $(n+1)$ -й диод некоторое случайное количество электронов ξ_i , так что

$$\text{при } \zeta_{n-1} = k \text{ получим } \zeta_n = \sum_{i=1}^k \xi_i.$$

Можно показать (см., например, [2], § 14.4), что если элементарный процесс ξ_i характеризуется математическим ожиданием $\mathbf{M}(\xi) = \sigma$ и дисперсией $\mathbf{D}(\xi)$, то процесс ζ_n имеет математическое ожидание $\mathbf{M}(\zeta_n) = \sigma^n$ и дисперсию

$$\mathbf{D}(\zeta_n) = \mathbf{D}(\xi) \frac{\sigma^n(\sigma^n - 1)}{\sigma(\sigma - 1)}. \quad (2.7.1)$$

Элементарный акт вторичноэмиссионного умножения описывается распределением Пуассона

$$p(\xi = m) = \frac{\sigma^m e^{-\sigma}}{m!}. \quad (2.7.2)$$

Математическое ожидание и дисперсия этого распределения равны σ . Легко видеть, что дисперсия получаемого распределения (2.7.1) очень велика. Относительная погрешность Δ_n , отношение среднеквадратичного отклонения $\delta m = \sqrt{\mathbf{D}(\zeta)}$ к среднему значению $K = \sigma^n$, с ростом n очень быстро стремится к величине $\Delta_\infty = (\sigma - 1)^{-1/2}$ и при $\sigma = 3 \dots 6$ составит $0.7 \dots 0.45$.

Реальное распределение из-за особенностей конструкции или условий эксплуатации может несколько отличаться от этого по следующим основным причинам:

— *сквозной пролет* электронов, при котором они, минуя n -й диод, попадают сразу на $(n+1)$ -й, приведет к эффективному уменьшению σ и увеличению относительной погрешности за счет увеличения количества импульсов малой амплитуды. Если на первых каскадах его возможность устранена, то этот эффект мало скажется на конечном результате;

— *обратная связь* уширит распределение за счет увеличения доли больших импульсов;

— *ограничение амплитуды пачки* из-за взаимного расталкивания электронов (часть из них может быть потеряна) или из-за ограниченной емкости диода и цепи его питания уменьшит долю больших импульсов и сузит распределение;

— *разброс времен пролета* равномерно уширит распределение, если регистрируется не количество электричества, а ток.

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

Единственный способ сузить распределение — увеличение σ , хотя бы на первом диноде. Одновременно уменьшается вероятность просчетов, потери первичного фотоэлектрона. Ведь при $\sigma = 3 \dots 6$ вероятность того, что фотоэлектрон не вырвет ни одного вторичного электрона на первом диноде, равна $\exp(-\sigma) = 5 \dots 0.25\%$. У ФЭУ-130 на первом диноде $\sigma = 30$. Это — хороший "одноэлектронный" ФЭУ. При $\sigma = 30$ просчеты почти невероятны и амплитудное распределение узко.

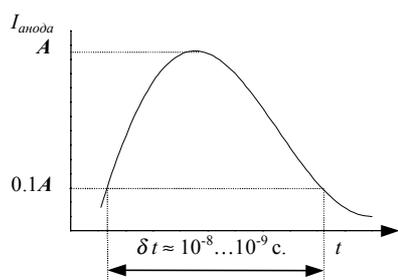


Рис. 2.7.5. Форма "одноэлектронного" импульса тока на аноде ФЭУ

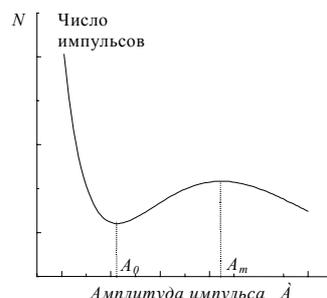


Рис. 2.7.6. Идеализированная форма амплитудного распределения одноэлектронных импульсов

Кроме полезных импульсов на выходе будут и шумовые, составляющие темновой ток ФЭУ. Большинство возможных причин образования первичного электрона, способного инициировать процесс умножения (космическое излучение, авто- и термоэмиссия из динодов и т.д.), проявляется случайным образом в случайной точке усилительного тракта. Такие электроны пройдут неполный процесс умножения и на выходе дадут пачку (импульс) малой амплитуды. Сюда же попадут и микропробои по цепи питания и элементам конструкции. Исключение составит только термоэмиссия из фотокатода. Термоэлектроны пройдут тот же процесс умножения, что и фотоэлектроны, и дадут на выходе импульсы, неотличимые от полезных.

Таким образом, следует ожидать, что суммарное амплитудное распределение импульсов на выходе ФЭУ будет иметь две составляющие:

- **полезные**, имеющие довольно широкое амплитудное распределение, но все-же с выраженным максимумом (здесь же и термоэлектроны из фотокатода);
- **шумовые** импульсы, количество которых растет с уменьшением амплитуды.

Режим счета одноэлектронных импульсов

Несколько идеализированная форма амплитудного распределения импульсов на выходе ФЭУ представлена на рис. 2.7.6. Реальное распределение часто оказывается более гладким, провал между полезными и шумовыми импульсами не всегда существует. Но если он существует (такие ФЭУ называют "счетными"), то, как видно из рис. 2.7.6, можно снабдить усилитель пороговым дискриминатором, чтобы отсеять импульсы с амплитудой меньше A_0 , и тем самым исключить большую часть шумового сигнала, "почти не потеряв" полезного. Дальше возможен просто подсчет числа (скорости поступления) импульсов. Отсюда и название этого метода регистрации.

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

Преимущество его именно в минимальных шумах. На хороших счетных ФЭУ (например, ФЭУ-100) при охлаждении фотокатода до температуры порядка $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при правильном выборе уровня дискриминации удается снизить скорость счета темновых импульсов до единиц в секунду. Соответственно, минимальный регистрируемый поток излучения — меньше 10 фотонов в секунду при площади фотокатода порядка 10 см^2 .

Основной недостаток метода — малый динамический диапазон измеряемых сигналов. Если собственное “мертвое время” измерительного тракта составляет 20 нс (за такое время он полностью справляется с обработкой сигнала и восстанавливает способность принять следующий импульс), то уже при средней частоте поступления случайных (во времени) импульсов 5 МГц вероятность совпадения пары импульсов примерно 3%. Возникает ошибка в измерениях, ибо вместо двух импульсов мы зарегистрируем один. Стандартные усилители имеют полосу пропускания порядка 50–100 МГц, так что динамический диапазон для этого режима — примерно 6 порядков, в области предельно слабых потоков. На больших частотах уже возможно перекрытие и собственных импульсов ФЭУ.

Режим постоянного тока

Этот режим используется наиболее часто. Не нужно слишком буквально понимать слова “постоянный ток”. ФЭУ — очень малоинерционный прибор, так что модуляция сигнала на частотах до нескольких килогерц не изменяет сколь-нибудь существенно параметров, определенных на нулевой частоте.

В режиме постоянного тока измерительная система, характеризующаяся относительно большой постоянной времени τ , интегрирует все поступающие импульсы, в том числе и темновые. Измеряется просто количество электричества, перенесенное с динодов на анод, т.е. произведение частоты поступления одноэлектронных импульсов на коэффициент усиления K и на время τ . Ограничений сверху на частоту поступающих импульсов здесь не возникает, существенна только мощность, выделяемая на последних динодах, а также — электрическая мощность цепей питания. Ток питания должен существенно превышать ток сигнала ФЭУ.

От темновых токов здесь не избавиться. Их среднюю величину можно учесть, но шум темнового тока остается и ограничивает обнаружительную способность. Тем не менее, динамический диапазон может достигать 9—12-ти порядков. Охлаждение фотокатода ФЭУ и в этом случае весьма полезно, так как уменьшает количество темновых импульсов большой амплитуды и в результате уменьшает темновой ток в несколько раз, а иногда — на порядки.

Режим счета многоэлектронных импульсов

Он часто используется в ядерной физике в экспериментах такого типа: частица высокой энергии направляется на люминофор и там порождает вспышку, число фотонов в которой велико и пропорционально энергии частицы. В ФЭУ, регистрирующем эту вспышку, *одновременно* генерируется несколько первичных фотоэлектронов и на аноде возникает импульс тока, амплитуда которого пропорциональна числу фотонов во вспышке, т.е. энергии частицы. С выхода ФЭУ сигнал подается на *амплитудный анализатор импульсов*, который

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

преобразует амплитуду в код, по коду выбирает нужную ячейку памяти и добавляет в нее единицу, отмечая тем самым, что пришел еще один импульс такой-то амплитуды. Как и для токового режима, здесь величина и, главное, стабильность коэффициента усиления имеют первостепенное значение.

Понятие динамического диапазона здесь двояко. Допустимую частоту поступления регистрируемых частиц лимитирует обычно не ФЭУ, а анализатор импульсов. Время преобразования амплитуды в код в многоканальных системах измеряется микросекундами, так что допустимая частота поступления импульсов обычно не выше нескольких килогерц.

Амплитуда пачки может быть значительной. В специальных ФЭУ с нежесткой фокусировкой она ограничивается просто электрической емкостью последних динодов и в основном определяется тем, как будут сделаны цепи питания. Реально оказывается возможным получить амплитудное разрешение более 100.

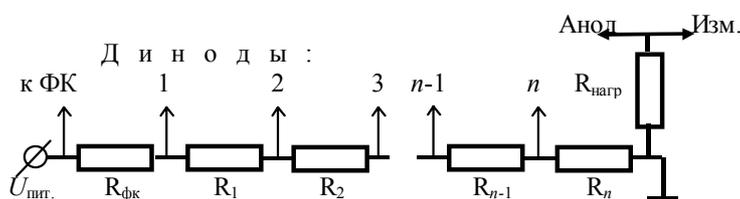
Питание ФЭУ

Рис. 2.7.7. Обычная, резистивная схема питания ФЭУ.

Чаще всего питание осуществляется от источника высокого напряжения $U_{\text{пит}} = -(1...2,5)$ кВ через резисторный делитель, рис. 2.7.7. Обычно все сопротивления в делителе одинаковы, но нужно обязательно ознакомиться с паспортом ФЭУ, могут быть делители неравномерные. Иногда на первых динодах нужно сильнее ускорять электроны, чем на оконечных для улучшения условий вытягивания с фотокатода и уменьшения разброса амплитуд выходных импульсов, см. раздел 2.7.2. Все определяется конструкцией динодной системы и материалом динодов.

Ток через делитель рис. 2.7.7 должен существенно превышать средний ток сигнала ФЭУ. Обычно он составляет от долей до единиц миллиампер. Но в счетном режиме, особенно при счете многоэлектронных импульсов, может оказаться, что при малом среднем токе ФЭУ пиковый ток в импульсе велик и разумные сопротивления делителя не обеспечивают пиковую мощность. В таких случаях резисторы последних каскадов шунтируют конденсаторами.

Из-за сильной зависимости коэффициента усиления K от напряжения к стабильности источника питания предъявляются высокие требования. Стабильность должна быть не хуже 10^{-4} — 10^{-5} , особенно — для работы в токовом режиме. В счетном режиме это требование может быть слабее. Если частота поступления импульсов амплитудой A_0 , на которой установлен уровень дискриминации, невелика (см. рис. 2.7.6), то малые изменения K почти не скажутся на регистрируемой скорости счета. На кривой зависимости скорости счета от напряжения питания наблюдается "плато".

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

2.7.3 Характеристики ФЭУ

Спектральная характеристика

Спектральная область чувствительности ФЭУ ограничивается с длинноволновой стороны порогом чувствительности фотокатода, а с коротковолновой — границей пропускания оптического окна. Наиболее часто в ФЭУ используются следующие окна:

<i>Материал</i>	<i>Область пропускания</i>
Стекло	$\lambda > 320$ нм
Увioletовое стекло (без примесей Fe)	$\lambda > 180—200$ нм
Кварцевое стекло	$\lambda > 150$ нм
Фтористый магний, MgF ₂	$\lambda > 110$ нм

Во всей видимой области спектра (400—700 нм) можно работать и со стеклянным окном. Увioletовое позволяет охватить всю область ближнего ультрафиолета, до так называемой *вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области*¹. ФЭУ с кварцевыми окнами имеют смысл и при работе не в вакуумном УФ, так как кварц более прозрачен, чем увiolet. Окна из MgF₂ незаменимы в ВУФ. Этот материал имеет практически рекордную область прозрачности (уступает только LiF — 105 нм), но имеет хорошие механические свойства, спаивается со стеклом, негигроскопичен. У чистого MgF₂ довольно резкая граница пропускания. Практически рабочая область простирается с ним до $h\nu = 11$ эВ (112 нм). Дальше просто нет прозрачных веществ, но при таких энергиях фотонов фотоэмиссия идет довольно эффективно почти из всех материалов, так что в более коротковолновой области можно использовать “открытые” умножители — то же, что диодные системы ФЭУ, но изготовлены без баллона и помещаются непосредственно в вакуумную камеру экспериментальной установки. Если освещать первый диод, то получится ФЭУ с вполне приличными характеристиками и темновыми токами порядка 1 электрона в секунду (с первого диода).

Чувствительность фотокатода удобнее всего характеризовать величиной квантового выхода фотоэмиссии $Y_k(\hbar\omega)$ или квантовой эффективностью K_λ . Это — безразмерные величины, равные отношению числа эмиттированных электронов к числу поглощенных (или упавших) квантов света. $Y_k(\hbar\omega)$ или K_λ далеко не постоянны в рабочей области. Они отличны от нуля только при $\hbar\omega \geq \hbar\omega_0 = I_{ph}$, называемой **порогом**, или **красной границей фотоэффекта**, или **фотоэлектрической работой выхода**. При продвижении в коротковолновую сторону $Y_k(\hbar\omega)$ быстро растет, пропорционально $\exp[Const \cdot (\hbar\omega - \hbar\omega_0)]$. Величина *Const* зависит от типа материала и конструкции фотокатода. Обычно фотокатоды — сложные двух- или многослойные системы, в которых

¹ Кислород воздуха эффективно поглощает излучение, начиная примерно со 180—190 нм. Более коротковолновая область требует вакуумирования приборов, отсюда и название.

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

приняты специальные меры к уменьшению поверхностного потенциального барьера.

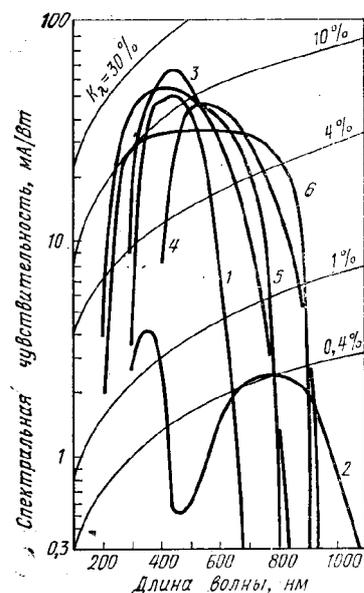


Рис. 2.7.8. Спектральные характеристики различных фотокатодов фирмы RCA (США):

- 1— сурьмяно-цезиевого;
- 2— оксидного;
- 3— мультищелочного;
- 4—6— сложных фотокатодов с отрицательным сродством к электрону.

K_{λ} — квантовая эффективность фото катода

Наилучшими свойствами обладают так называемые **фотокагоды с отрицательным сродством к электрону** — полупроводниковые системы, в которых возбужденный в объеме фотоэлектрон выходит в вакуум без дополнительного потенциального барьера. В них $Y_k(\hbar\omega)$ быстро достигает максимального значения, иногда более 0,5, и остается примерно постоянным в относительно широкой области. Спектральная характеристика ФЭУ с такими катодами может быть близка к П-образной, см. рис. 2.7.8. В общем же случае можно ожидать самых разных форм спектральной зависимости чувствительности, в том числе и с выраженной структурой, как у оксидного фото катода на рис. 2.7.8.

Для технических целей часто используется такая характеристика ФЭУ, как **спектральная чувствительность фото катода** — почти то же, что **квантовый выход**, но отнесена к **энергии** падающего излучения, а не к числу квантов, и приводится в единицах А/Вт. Например, для ФЭУ-130 (SbCsK-фото катод, спектральная область 200—650 нм, максимум чувствительности — 400...420 нм) паспортная спектральная чувствительность на длине волны 410 нм ($\hbar\omega = 3.024$ эВ) равна 0,03 А/Вт, т.е. квантовый выход фотоэмиссии $Y_k(3 \text{ эВ}) = 0.091$. Традиционно приводится и светотехническая характеристика — **чувствительность фото катода** (интегральная, не спектральная), измеряемая в единицах А/лм.

На рис. 2.7.8 приведены спектральные характеристики ряда ФЭУ американской фирмы RCA, имеющих стеклянные или увиолевые окна. Большинство отечественных ФЭУ имеют характеристики типа 1—3.

Все фотокагоды по спектральной характеристике грубо можно разделить на три группы:

- инфракрасные (оксидный катод, порог — 1,2 мкм);
- УФ-видимые (сурьмяно-цезиевый и мультищелочные катоды с порогом 650—850 нм);

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

— “солнечно-слепые” или просто “слепые”, нечувствительные к видимому или даже ближнему УФ-излучению. Обычно их фотокатоды – металлы или простые двойные соединения. Например, полупрозрачный CsJ-фотокатод на окне из MgF_2 чувствителен в области 112—210 нм (11.0—5.9 эВ), причем на 210 нм его чувствительность составляет всего 1% от максимальной (ФЭУ-154).

В заключение отметим, что для каждого эксперимента нужно специально подбирать ФЭУ. Спектральная характеристика не должна простирается далеко в длинноволновую область, иначе будут чрезмерны термоэмиссионные **темновые токи** с фотокатода, пропорциональные $\exp(-\Phi_T/kT)$. По этой причине ФЭУ с оксидным катодом применяют только в специальных случаях, когда необходима длинноволновая граница чувствительности. Если нужно работать только в ультрафиолете, предпочтение отдают сурьмяно-цезиевым или солнечно-слепым фотокатодам.

Анодная чувствительность и коэффициент усиления

Статические параметры ФЭУ в целом измеряются при освещении фотокатода постоянными световыми потоками, а регистрация анодного тока осуществляется приборами постоянного тока (микроамперметрами или, при нагрузке ФЭУ на известное сопротивление, вольтметрами).

При определении **анодной чувствительности** фотокатод освещается световым потоком известной величины Φ от стандартного источника света. По измеренной величине анодного тока I вычисляется значение анодной чувствительности:

$$Y_a[A/\text{лм}] = I[A]/\Phi[\text{лм}] \quad (2.7.3)$$

В паспортах ФЭУ обычно приводятся величины напряжения питания, при которых анодная чувствительность составляет 10, 100, 1000 А/лм. Реже приводятся значения напряжений, соответствующих определенным величинам **спектральной анодной чувствительности**.

Отношение анодной чувствительности к чувствительности фотокатода и есть коэффициент усиления ФЭУ K , т.е. усиление его диодной системы.

Коэффициент вторичной эмиссии, эффективность диодного каскада σ , а с ним и коэффициент усиления ФЭУ очень сильно зависят от напряжения питания. В диапазоне энергий падающих первичных электронов $E_0 = 50 \dots 150$ эВ можно считать, что σ примерно пропорциональна E_0 , $\sigma(E_0) \cong a + b \cdot E_0$ так что K — сложная функция напряжения питания, в пределе — степенная, с показателем степени, равным числу диодов.

Темновой ток, шум, пороговая чувствительность, обнаружительная способность

Чрезвычайно важными являются параметры ФЭУ, определяющие минимальные величины измеряемых световых потоков. Нижний предел определяется темновым током и шумами ФЭУ. Темновой ток — это ток в цепи анода ФЭУ, полностью защищенного от воздействия света.

Источниками темнового тока являются: термоэлектронная эмиссия фотокатода, автоэлектронная эмиссия из электродов, ток утечки в анодной цепи.

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

Токи, обусловленные ионной и оптической обратными связями, дают вклад в шумы, в том числе — в шум полезного сигнала.

Каждая из составляющих темнового тока зависит от напряжения питания ФЭУ, но по-разному. Различают три области, разделенные на рис. 2.7.9 вертикальными штриховыми линиями:

I — при низких напряжениях основной вклад в величину I_T дают токи утечки;

II — рабочая область ФЭУ, в которой основной источник шума — термоэмиссия из фотокатода;

III — при высоких напряжениях — область нестабильной работы, I_T обусловлен автоэлектронной эмиссией и обратными связями.

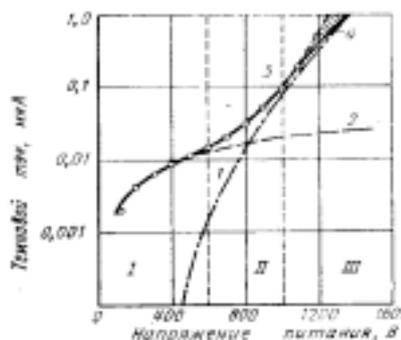


Рис. 2.7.9. Возможный ход зависимости от напряжения темнового тока (кривая 4, точки) и его составляющих:

- 1 — термоэмиссионной;
- 2 — утечки;
- 3 — автоэмиссионной.

Заштрихована область разброса параметров из-за возможных нестабильностей и возникновения автоионизационного тока.

Кривая *I* показывает зависимость термоэмиссионной составляющей темнового тока, но поскольку сам ток термоэмиссии никак не зависит от напряжения питания, то кривая *I* отражает просто зависимость $K(U)$. Следовательно, так же зависит от напряжения и полезный сигнал.

Из рис. 2.7.9 видно, что в областях *I* и *II* полный темновой ток растет с увеличением напряжения питания медленнее, чем полезный сигнал, так что выгодно увеличивать напряжение питания для улучшения отношения сигнал/шум. Но при больших напряжениях начинаются нестабильности, проявляются такие процессы, как автоэлектронная эмиссия с элементов конструкции ФЭУ и обратная связь.

Автоэлектронная эмиссия (или холодная эмиссия) — отрыв электронов от поверхности твердого тела вытягивающим полем. Это — чисто квантовомеханический эффект прохождения электронов сквозь потенциальный барьер, не имеющий объяснения в классической физике. Его оптический аналог — прохождение света сквозь тонкие фольги металлов, толстые слои которых являются хорошими зеркалами. Автоэмиссия возникает в полях порядка внутрикристаллических, т.е. $\approx(10^6 — 10^7)$ В/см. Если Вы рассмотрите ФЭУ, оцените расстояния между электродами и учтете, что разность потенциалов между соседними диодами не более 200 В, Вам сразу станет ясно, что таких полей в ФЭУ просто не может быть. Это естественно. Возникновение автоэмиссионных токов должно быть по возможности исключено, но никогда нельзя уверенно гарантировать, что на каких-то диодах не останутся заусеницы, мельчайшие острия. На них поле будет концентрироваться, возможно — возникнет автоэмиссия. Граница появления этого темнового тока трудно предсказуема, у каждого экземпляра ФЭУ она своя.

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

Автоэмиссия и обратная связь имеют разные вольтамперные характеристики, но существеннее то, что величина автоэмиссионного тока зависит только от напряжения питания, а ток, возбуждаемый обратной связью, пропорционален нагрузке ФЭУ, полезному сигналу. По этому признаку их можно разделить, но нас этот вопрос не должен волновать, так как рабочее напряжение все равно надо выбирать в области, где не сказываются нестабильности.

Обычно для определения оптимального режима питания ФЭУ снимают вольтамперные зависимости полезного (при стабильной засветке) и темнового токов ФЭУ. Рабочая область — область максимума их отношения.

Если мы знаем величину анодной чувствительности Y_a [А/лм], то величину темнового тока можно выразить в единицах светового потока, дающего такой же сигнал. Эта величина называется *световым эквивалентом темнового тока*, $\Phi_{\text{эkv}}$:

$$\Phi_{\text{эkv}} [\text{лм}] = I_T [\text{А}] / Y_a [\text{А/лм}] \quad (2.7.4)$$

и определяет величину минимального измеримого сигнала.

На рис. 2.7.10 представлены зависимости $\Phi_{\text{эkv}}(U_{\text{пит}})$ для ряда отечественных ФЭУ.

Реально обнаружительная способность лимитируется все-таки не темновым током, а его шумами. Среднюю величину темнового тока можно измерить и учесть, а его шум внесет в измерения неустранимую погрешность. Уменьшить ее можно ограничением регистрируемой полосы частот Δf . Поскольку основная составляющая шумов — *белый шум*, то регистрируемая мощность его $U_{\text{ш}}^2 \sim \Delta f$. Если полезный сигнал промодулирован на некоторой частоте f_0 , а для регистрации используется резонансный усилитель со средней частотой f_0 и шириной полосы пропускания Δf , то мы регистрируем лишь часть флуктуаций темнового тока, пропорциональную $(\Delta f)^{1/2}$. Отсюда такая характеристика, как *порог чувствительности* ФЭУ $F_{\text{п}} [\text{лм} \cdot \text{Гц}^{-1/2}]$ — величина, равная световому эквиваленту шумов в полосе 1 Гц.

На рис. 2.7.11 для ряда ФЭУ приведены пороги чувствительности как функции анодной чувствительности. Здесь опять-таки видно, что увеличение анодной чувствительности (повышением напряжения питания) имеет смысл лишь до некоторого предела, за которым темновой ток и его шумы начинают быстро расти.

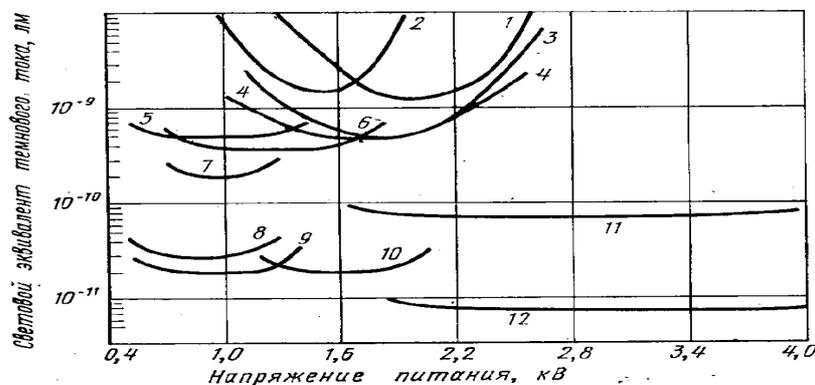


Рис. 2.7.10. Зависимости чувствительности различных типов ФЭУ от напряжения питания:

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

- 1 — ФЭУ-58; 4 — ФЭУ-81; 7 — ФЭУ-85; 10 — ФЭУ-79;
 2 — ФЭУ-55; 5 — ФЭУ-19; 8 — ФЭУ-17, ФЭУ-18; 11 — ФЭУ-91,
 3 — ФЭУ-54; 6 — ФЭУ-51; 9 — ФЭУ-64; 12 — ФЭУ-92.

Световой эквивалент темнового тока $\Phi_{\text{экв}}$, т.е. световой поток, создающий на выходе ФЭУ сигнал, равный темновому, может не зависеть от напряжения в том случае, если и полезный и темновой токи зависят от напряжения одинаково, см. рис. 2.7.9, область II.

Если полезный световой сигнал наложен на фоновую “подставку”, то шум от фона так же вреден, как и шум темнового тока. Поэтому иногда вводят аналогично $F_{\text{п}}$ такие характеристики, как **порог чувствительности при постоянном световом фоне** $F_{\text{пс}}$ [лм·Гц^{-1/2}]. Для монохроматического освещения удобнее пользоваться не светотехническими единицами (люмен), а энергетическими, и соответственно определять **спектральный порог чувствительности** — $F_{\text{пл}}(\lambda)$ [Вт·Гц^{-1/2}]. На рис. 2.7.12 эти характеристики приведены в функции длины волны.

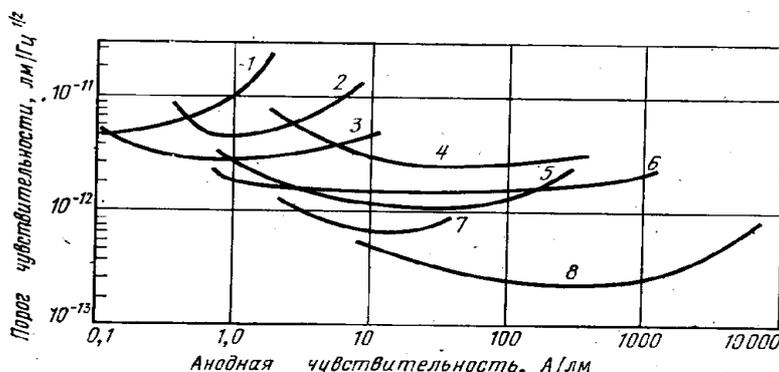


Рис. 2.7.11. Порог чувствительности как функция анодной чувствительности различных типов ФЭУ:

- 1 - ФЭУ-26; 3 - ФЭУ-20; 5 - ФЭУ-51; 7 - ФЭУ-69;
 2 - ФЭУ-31А; 4 - ФЭУ-27 6 - ФЭУ-17, ФЭУ-18; 8 - ФЭУ-64, ФЭУ-79, ФЭУ-106.

Приведенные характеристики применимы при использовании ФЭУ в токовом режиме. Попробуем оценить реальный порог чувствительности для режима счета одноэлектронных импульсов. Предположим, что, выбрав правильный уровень дискриминации (см. раздел 2.7.2 и рис. 2.7.6), мы отсеяли все импульсы, рожденные не на фотокатоде. Тогда шум (темновой ток) будет определяться только термоэлектронами из фотокатода, поскольку они дадут такой же импульс на выходе, как и фотоэлектроны. Величина термоэлектронного тока может быть определена по формуле Ричардсона—Дешмана:

$$j = I_T/S = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_T}{kT}\right), \quad (2.7.6)$$

где S — площадь фотокатода; A — постоянная (теоретическое значение $A = 120$ А/(см²град²), экспериментальные — меньше); Φ_T — термоэлектронная работа выхода фотокатода (у металлов она равна, у полупроводников — меньше фотоэлектронной).

Если спектральный порог чувствительности ФЭУ порядка 800 нм, т.е. $\Phi_T \cong 1.5$ эВ или меньше, $T = 290$ К и $S \cong 7$ см² (диаметр 30 мм), то $I_T \geq 6.4 \cdot 10^{-19}$

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

$A=4$ электрона/с. На выходе получим темновой ток, равный 4-м импульсам в секунду. С учетом квантового выхода фотокатода в максимуме чувствительности $Y_k \cong 0.1...0.5$, такой же сигнал даст световой поток 40...8 фотонов в секунду. Охлаждение фотокатода уже до температуры 270 К уменьшит термоэмиссию примерно на два порядка. В общем, предельную чувствительность ФЭУ в таком режиме удастся довести до 1...10 фотонов в секунду.

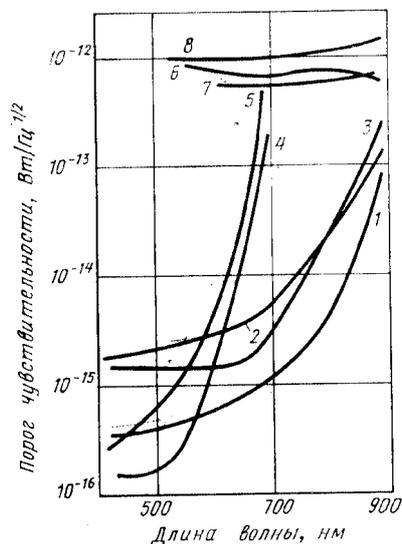


Рис. 2.7.12. Спектральный порог чувствительности некоторых типов ФЭУ:

- 1 — ФЭУ-70;
- 2 — ФЭУ-51;
- 3 — ФЭУ-88;
- 4 — ФЭУ-64;
- 5 — ФЭУ-17, ФЭУ-18;
- 6 — ФЭУ-62;
- 7 — ФЭУ-22;
- 8 — ФЭУ-28.

Открытые электронные умножители (ВЭУ) и микроканальные умножительные пластины (МКП)

Умножитель с непрерывным динодом, выполненный так, как это показано на рис. 2.7.4, плох тем, что в нем велика обратная ионная и оптическая связь. Легко видеть, что электрическое поле в нем направлено по оси умножительного канала. Поэтому каждый ион, образованный соударением электрона с молекулой остаточных газов в объеме канала, с большой вероятностью будет вытянут далеко в сторону фотокатода и там выбьет из поверхности один или несколько электронов, которые включатся в общий поток. Так же и квант люминесценции молекул газа или поверхности канала, возбужденный электронным ударом, может в свою очередь выбить фотоэлектрон где-нибудь в прикатодной области. Уменьшить эти эффекты можно либо искривлением канала, либо наклоном канала по отношению к торцам, на которые подается питающее напряжение. Во втором случае эквипотенциальные поверхности будут неперпендикулярны оси, т.е. поле будет иметь перпендикулярную оси составляющую, что уменьшит возможную длину дрейфа иона, хотя и менее эффективно, чем при изгибе канала. Изгиб позволяет, кроме того, уменьшить оптическую связь.

Первый способ используется в открытых *вторичноэлектронных умножителях* типа ВЭУ-4, ВЭУ-6. Второй — в микроканальных пластинах (МКП), о которых мы упоминали в конце раздела 2.7.1.

Открытые *вторичноэлектронные умножители* (ВЭУ) — те же ФЭУ, но они, во-первых, не имеют специального фотокатода, а во-вторых, изготавливаются из материалов, которым не страшен вынос на воздух. Дело в том, что в обычных ФЭУ, запаянных в герметичный баллон, поверхности и фотокатодов и динодов проходят специальную обработку для получения желаемых

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

электронноэмиссионных свойств. Для них вынос на воздух недопустим, поверхности будут необратимо испорчены, в первую очередь — из-за взаимодействия с кислородом. А в ВЭУ и МКП поверхности окисляются, так что кислород им не страшен. Более того, прогрев в кислороде активизирует их. Проблема только в том, чтобы найти вещества, окислы которых обладают удовлетворительными эмиссионными свойствами.

ВЭУ-4 представляет собой сплюснутую трубку с внутренним сечением примерно 2×5 мм, изогнутую по радиусу ~ 20 мм. Длина — чуть менее половины окружности. ВЭУ-6 — тонкая трубка, диаметром около 1.5 мм, изогнута по радиусу 5—6 мм, чуть более одного витка. На входе канал расширяется конусом $\sim 90^\circ$ до диаметра 1 см. Напряжение питания ВЭУ — 2.5...4.5 кВ, при этом коэффициент усиления составляет 10^7 — 10^8 , собственные шумы не более 1 одноэлектронного импульса в секунду. Как видно, параметры достаточно хороши, чтобы с такими умножителями было удобно работать в режиме счета одноэлектронных импульсов для измерения слабых потоков.

ВЭУ очень удобны во многих отношениях, в том числе тем, что не требуют для питания делителей напряжения. Их внутренняя поверхность покрыта тонким полупроводниковым окисным слоем, по которому при рабочем напряжении питания течет ток порядка долей миллиампера. Из-за этого возникают два интересных эффекта. Во-первых, амплитуда одноэлектронного импульса на выходе ограничена. Короткий (порядка 10^{-8} с) выходной импульс уносит с поверхности около 10^{-10} — 10^{-11} Кл, так что поверхность заряжается положительно. Увеличение напряжения питания не поможет поэтому сделать амплитуду импульса больше некоторой, при которой эта положительная зарядка станет критичной. В рабочем режиме одноэлектронные импульсы ВЭУ имеют поэтому существенно более узкое амплитудное распределение, чем в обычных ФЭУ (рис. 2.7.6). Это удобно, но одновременно возникает второй, неудобный эффект. При токе питания 10^{-4} А наведенный заряд 10^{-10} Кл может быть нейтрализован только за время порядка 10^{-6} с. Следовательно, в течение примерно микросекунды ВЭУ не способен “отработать” следующий импульс, так что допустимая скорость счета ВЭУ ограничена загрузками примерно 10^5 или меньше импульсов в секунду.

Конструкция МКП напоминает пчелиные соты, только каналы в них, во-первых, круглые, во-вторых, расположены под углом к торцам, порядка 15° . Торцы металлизированы, к ним подводится напряжение питания. Диаметры каналов 10...20 мкм, “Прозрачность” пластин (отношение площади каналов к общей площади пластины) — порядка 50%, так что на 1 см^2 — более 10^5 отдельных, включенных параллельно, умножителей. К сожалению, такие пластины отечественного производства имеют коэффициент усиления не более 10^4 .

Здесь амплитуда ограничивается зарядкой гораздо меньшей емкости, чем в крупногабаритных ВЭУ. Кроме того, ток питания через каждый канал на много порядков меньше, чем в ВЭУ, так что и время восстановления канала велико, порядка нескольких секунд.

Для получения коэффициента усиления 10^6 — 10^7 , достаточного для регистрации одноэлектронных импульсов, приходится включать две МКП последовательно. Их ориентируют относительно друг друга по “шевронной схеме”, с противоположно наклоненными каналами. Иначе будет велика обратная

2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

ионная связь. Если подобрать зазор между пластинами и поле в зазоре так, чтобы электронная пачка, рожденная в канале первой МКП, распределилась на достаточно большую поверхность второй МКП, то в ней удастся возбудить 100...1000 каналов, каждый из которых даст пачку $\sim 10^4$ электронов, т.е. всего — 10^6 — 10^7 . Шумы такой сборки также не превышают 1 импульса в секунду, напряжение питания — порядка 1.5 кВ.

Все ВЭУ и МКП рассчитаны, в основном, на регистрацию электронов, но могут использоваться и для регистрации света в области далекого ультрафиолета. Работа выхода их поверхностей составляет ~ 5 эВ ($\lambda < 250$ нм). На рис. 2.7.13 показана схема устройства, предназначенного для измерения света.

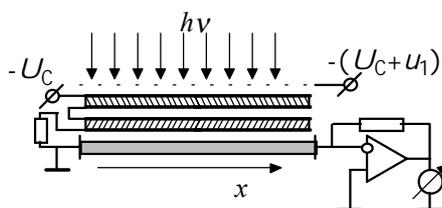


Рис. 2.7.13. Сборка из двух умножительных МКП с резистивным позиционночувствительным датчиком (ПЧД).

Здесь изображена шевронная сборка. Квант света падает на внешнюю поверхность первой МКП и возбуждает процесс умножения только в том случае, если выбитый им фотоэлектрон будет затянут в один из каналов. При прозрачности МКП ~ 0.5 вероятность этого — тоже порядка 0.5, так что приходится принимать меры для того, чтобы “втянуть” в каналы даже фотоэлектроны, образованные на внешней поверхности. Для этого перед сборкой ставят дополнительную сетку и создают во внешнем пространстве запирающее поле порядка 1000 В/см.

На выходе сборки пачка электронов возникнет в том месте, где был поглощен фотон. Величина ошибки — порядка расстояния между соседними каналами плюс возможная асимметрия в расширении пучка на выходе первой и второй пластин. Обычно это не более 30—50 мкм. Таким образом, если мы обеспечим не только регистрацию факта поступления импульса, но и зафиксируем координату x , то такая сборка может быть использована как позиционночувствительный детектор, например — вместо фотопластинки в спектрографе для коротковолновой области спектра.

На рис. 2.7.13 схематически показан также резистивный ПЧД. Принцип действия основан на том, что электронный импульс делится на два канала: от точки падения на резистор — влево, на “землю”, и вправо, на детектор. В такой схеме при однородном линейном резисторе усилитель зарегистрирует импульс с относительной амплитудой $A/A_0 = x/L$, где A_0 — полная амплитуда тока электронной пачки МКП на нагрузочном сопротивлении усилителя; L — длина резистора, x — координата, отсчитанная от его левого края. В случае, если мы можем считать амплитуды всех пачек A_0 одинаковыми, все получается и так хорошо. Если нет, то перед резистором надо поставить металлическую сетку, которая будет улавливать определенную (небольшую) часть электронов, и еще один усилитель. Тогда сигнал от сетки будет пропорционален A_0 и координату можно определить, вычислив отношение амплитуд двух импульсов, регистрируемых одновременно.

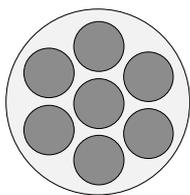
2.7. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

Рис. 2.7.14. Расположение семи дискретных анодов в двухкоординатном ПЧД на основе сборки МКП.

Позиционная чувствительность может быть обеспечена разными методами, не только резистивным анодом. У нас выпускаются ВЭУ с семью анодами, рис. 2.7.14. Здесь расчет на то, что электронная пачка на выходе МКП идет достаточно широким конусом, так что захватывает сразу несколько анодов. Семь сигналов регистрируются одновременно и соотношение между ними определяет координаты центра пачки. Это — двухкоординатный ПЧД.

СОДЕРЖАНИЕ 2-ГО РАЗДЕЛА**2. Оптические приборы****2.1. Призма****2.2. Дифракционная решетка****2.3. Интерферометры****2.4. Вспомогательные узлы спектральных приборов****2.5. Призменные и дифракционные спектральные приборы****2.6. Фурье — спектрометры****2.7. Фотоэлектронный умножитель****2.8. Тепловые приемники излучения****ЛИТЕРАТУРА**

-
- 1 И.И.Анисимова, Б.М.Глуховской, Фотоэлектронные умножители. М., Сов.радио, 1974.
 - 2 А.А.Боровков, Теория вероятностей. М., Наука, 1986.