

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Фотоэлементы. Устройство. Принцип работы

Электривакуумные фотоэлектронные приборы - это приборы, которые преобразуют энергию электромагнитного излучения в электрические сигналы. Принципы работы электровакуумных фотоэлектронных приборов основаны на использовании фотоэлектронной эмиссии. Рассмотрим основные свойства электровакуумных фотоэлектрических приборов, к которым относятся **фотоэлементы** и **фотоэлектронные умножители**.

Фотоэлементом называют электровакуумный прибор, использующий при своей работе явление внешнего фотоэффекта¹. Различают **электровакуумные** и **газонаполненные фотоэлементы**, которые отличаются друг от друга степенью разреженности газа в рабочем пространстве. В настоящее время наиболее широко применяются электровакуумные фотоэлементы, которые имеют два электрода: фотокатод, служащий источником электронов, и анод, собирающий фотоэлектроны. Анод изготавливают в виде плоской сетки, кольца, диска и т.д.; анод без больших потерь должен пропускать свет на фотокатод.

В видимой, инфракрасной и ближней ультрафиолетовой областях спектра наибольшее применение находят фотокатоды на основе полупроводниковых материалов.

Основными параметрами фотокатодов являются:

- **монохроматическая токовая чувствительность $S_{\phi}(\lambda)$** , которая определяется отношением фототока I_{ϕ} к полной мощности излучения $P_{изл}$ с длиной волны λ , падающей на чувствительную площадку, т.е.

$$S_{\phi}(\lambda) = I_{\phi} / P_{изл}(\lambda), \text{ А/Вт}$$

- **интегральная токовая чувствительность:**

$$S_{\phi_{инт}} = \int_{\lambda} S_{\phi} d\lambda$$

где S_{ϕ} - спектральная плотность чувствительности, $S_{\phi} = \text{А}/(\text{Вт} \cdot \text{мкм})$, $\lambda = \text{мкм}$;

- **квантовый выход** или **квантовая эффективность** - отношение числа выбитых с катода электронов к общему числу падающих фотонов;

- **удельное сопротивление 1 см^2 площади фоточувствительного слоя;**

¹ **Явление внешнего фотоэффекта** заключается в следующем: отдельные фотоны электромагнитного излучения поглощаются электронами и соответственно передают им энергию достаточную для выхода за пределы атома

- **плотность тока термоэмиссии** при комнатной температуре.

По области рабочего спектра фотокатоды разделяются на:

- работающие в ультрафиолетовой области излучения.
- видимой области излучения.
- инфракрасной области излучения.

Фотоэлементы классифицируются на основе конструктивных признаков фотокатодов. В соответствии с этим все фотоэлементы можно разбить на три группы (Рис.1):

1) **фотоэлементы с массивным непрозрачным фотокатодом**, нанесенным на дно стеклянной колбы (баллона) (Рис.1.а) - это приборы, являющиеся приемниками постоянных или модулированных низкой частотой ($f < 20$ кГц) световых потоков и используемые в контрольно-измерительной аппаратуре, в автоматике, аппаратуре звуковоспроизведения. Имеют рабочее напряжение < 240 В.

2) **фотоэлементы с массивным небольшим катодом**, нанесенным или на дно баллона, или на специальную металлическую пластину (Рис.1.б) - это приборы,

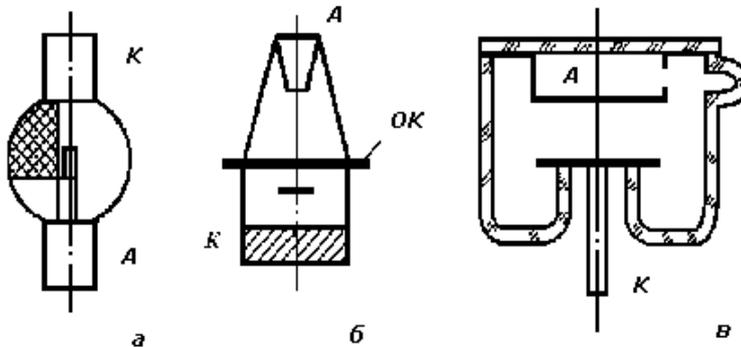


Рис.1

предназначенные для приема сфокусированного излучения малой интенсивности, в которых для уменьшения токов утечки выводы катода и анода сделаны с противоположных сторон баллона. Имеют рабочее

напряжение < 100 В.

3) **импульсные сильноточные элементы с фотокатодом на металлической подложке** (Рис.1.в), имеющие малое продольное сопротивление, малую инерционность ($\sim 10^{-3}$ с), линейную энергетическую характеристику и большую эмиссионную способность, достигающую 100 А при длительности импульса до 10^{-9} с. Имеют рабочее напряжение от 100В до 2,0 кВ.

Для уменьшения токов утечки в баллон часто вваривают специальные охранные кольца ОК (см. Рис.1.б). При конструировании импульсных фотоэлементов стремятся уменьшить влияние времени пролета фотоэлектронов между катодом и анодом, междуэлектродные емкости, сопротивления и индук-

тивности выводов, поэтому выводы катодов делают короткими, а выводы анодов часто выполняют в виде кольца, применяют коаксиальные выводы.

Параметры и характеристики фотоэлементов

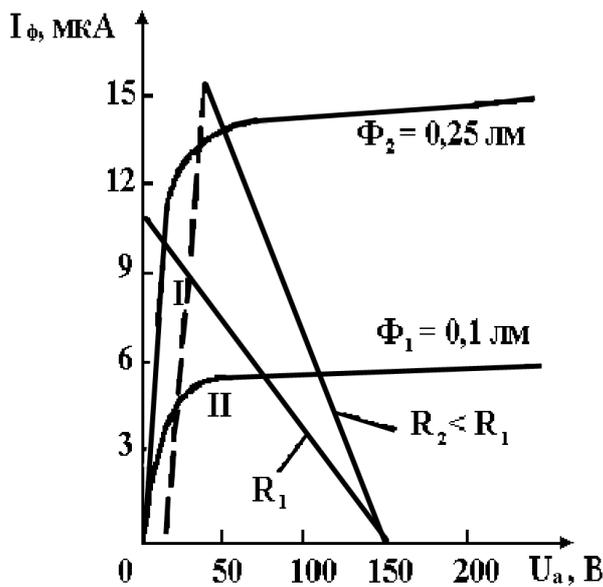
Основные параметры фотоэлементов:

- квантовый выход²
- шумы
- минимально регистрируемая мощность излучения (пороговый поток)
- темновой ток
- сопротивление
- обнаружительная способность D^* , определяемая соотношением:

$$D^* = S_{\Phi} \sqrt{\frac{A \Delta f}{i_{ш}^{-2}}}$$

где: D^* измеряется в см Вт⁻¹ Гц^{1/2}; $\sqrt{i_{ш}^{-2}}$ - среднеквадратичное значение шумового тока; Δf - рабочая полоса частот; A - площадь поверхности светочувствительного слоя;

Эксплуатационные и конструктивные параметры:



- максимально допустимая рассеиваемая мощность
- нестабильность чувствительности и темнового тока во времени
- температурный коэффициент чувствительности и др.

К основным характеристикам фотоэлементов относятся:

- вольт-амперные характеристики $I_{\Phi} = f(U_a)^3$ - Рис.2. При малых значениях U_a в приборе реализуется режим объемного заряда, т.е. у поверхности катода за счет фотоэмиссии

² **Квантовый выход или квантовая эффективность** – это количество фотоносителей, рожденных каждым фотоном, падающим на светочувствительный слой фотоприемника.

³ **Вольт-амперная характеристика $I_{\Phi} = f(U_a)$** - зависимость фототока I_{Φ} от напряжения анода U_a при неизменном световом потоке $\Phi = \text{const}$.

образуется область отрицательного объемного заряда и не все электроны попадают на анод (ток ограничен полем объемного отрицательного заряда и определяется законом "степени трех вторых"). По мере увеличения U_a все, большее количество электронов из области объемного заряда имеет возможность уйти на анод, ток растет, а плотность объемного заряда уменьшается. Часть электронов попадает на поверхность баллона, вызывая вторичную эмиссию с коэффициентом $\sigma_{<1}$. На втором участке объемный заряд отсутствует и все электроны, эмитированные катодом, попадают на анод (режим насыщения). Согласно закону Столетова увеличение интенсивности светового потока будет вызывать нарастание тока эмиссии и величина тока насыщения будет больше. Значение напряжения, соответствующее началу участка насыщения, определяется конструкцией прибора и возрастает при увеличении интенсивности светового потока из-за возрастания плотности объемного заряда у поверхности фотокатода.

- **Спектральные характеристики $S_\lambda = f(\lambda)$** – это зависимость монохроматической чувствительности S_λ от длины электромагнитной волны λ (или частоты),

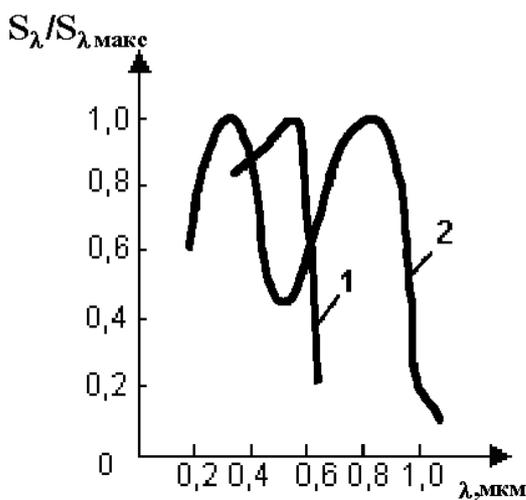


Рис.3

воздействующей на фотокатод электровакуумного фотоэлемента. Спектральные характеристики для сурьмяно-цезиевого (1) и кислородно-цезиевого (2) катодов показаны на Рис.3. Эти характеристики определяются в основном электрофизическими параметрами полупроводниковых материалов, из которых изготовлены фотокатоды. Конструктивные свойства также влияют на $S_\lambda = f(\lambda)$; к ним можно в первую очередь отнести толщину фотокатода, материал

подложки, физические свойства окна (стекла) фотоприемника. Кроме описанных сурьмяно-цезиевых и кислородно-цезиевых фотокатодов в фотоэлементах применяют многощелочные фотокатоды, образованные соединениями сурьмы с атомами калия, натрия и цезия $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$. Максимальная чувствительность фотокатода достигается, когда отношение Na и K приблизительно равно двум, а доля цезия много меньше калия.

- **энергетические (световые) характеристики $I_\Phi = f(\Phi)$** – это зависимости фототока I_Φ от интенсивности светового потока Φ при неизменном анодном напряжении U_a . Эти характеристики линейны в большом диапазоне изменения

Φ (Рис.4), что определяется законом Столетова⁴. Отклонение от линейности при больших значениях Φ обусловлено влиянием объемного заряда и утомлением (снижением эффективности) фотокатода.

При $\Phi=0$ фототок I_Φ несколько отличается от нуля. Существует темновой ток,

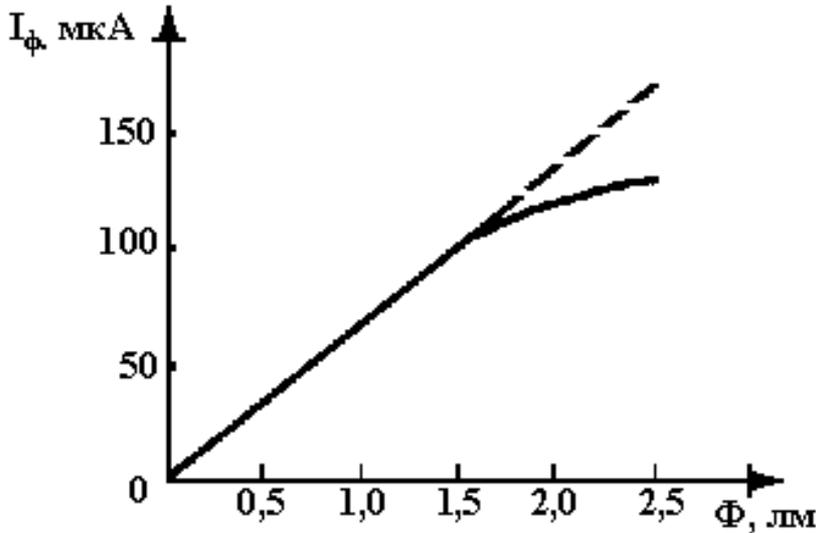


Рис.4

обусловленный термоэлектронной эмиссией электронов с фотокатода при комнатной температуре и токами утечки (проводимости) по стеклу баллона. При наличии нагрузки в цепи фотоэлемента световая характеристика также может существенно отклоняться от линейной, особенно, если нагрузочная

прямая будет пересекать вольт-амперные характеристики при больших Φ в области, соответствующей режиму ограничения тока объемным зарядом (участок

I на вольт-амперных характеристиках Рис.2).

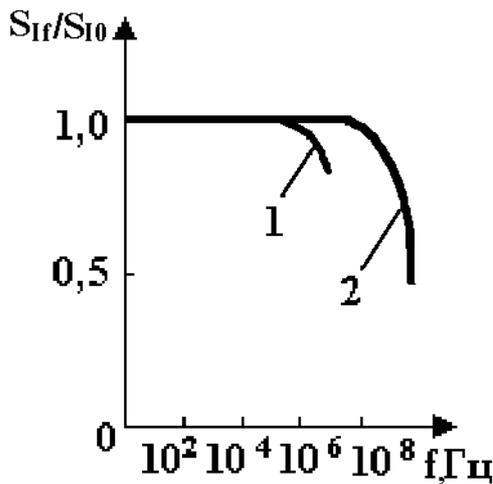


Рис.5

- частотные характеристики $S_I = \psi(f)$ – это зависимость чувствительности фотоэлемента от частоты изменения (модуляции) интенсивности светового потока, воздействующего на фотокатод. На Рис.5 приведены характеристики обычного (кривая 1) и импульсного (кривая 2) фотоэлементов. Уменьшение чувствительности при высоких частотах модуляции

⁴ Закон Столетова утверждает, что число испускаемых за единицу времени электронов пропорционально потоку энергии падающего излучения $I = J_v \Phi$, где J_v - спектральная чувствительность фотоэлемента, Φ – падающий монохроматический световой поток.

интенсивности света вызвано временем пролета электронов от катода до анода и переходными процессами (временем релаксации) в электрической цепи, в которую включен фотоэлемент.

- **температурные** Рассмотренные параметры и характеристики фотоэлементов подвержены изменениям под влиянием температуры. Эта зависимость отражается в изменении параметров фотокатодов от температуры или температурных коэффициентов.

Фотоэлектронные умножители. Устройство. Принцип работы

Фотоэлектронные умножители (ФЭУ) - это электровакуумные приборы, в которых ток фотоэлектронной эмиссии усиливается посредством вторичной электронной эмиссии.

ФЭУ представляет собой электровакуумный фотоэлемент, объединенный с электронной усилительной системой в едином корпусе (баллоне). Действие усилительной системы основано на явлении вторичной электронной эмиссии. Устройство фотоэлектронного умножителя показано на Рис.6.

Под действием света падающего на фотокатод **ФК** эмитируются фото-

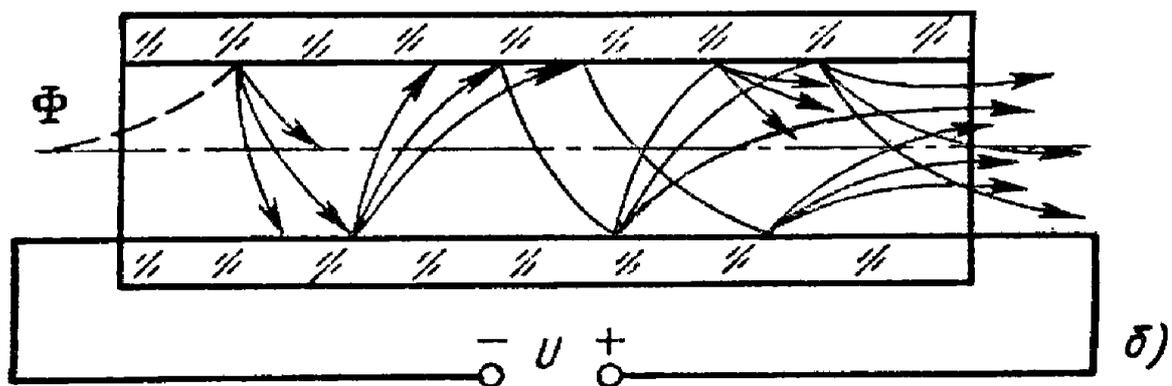
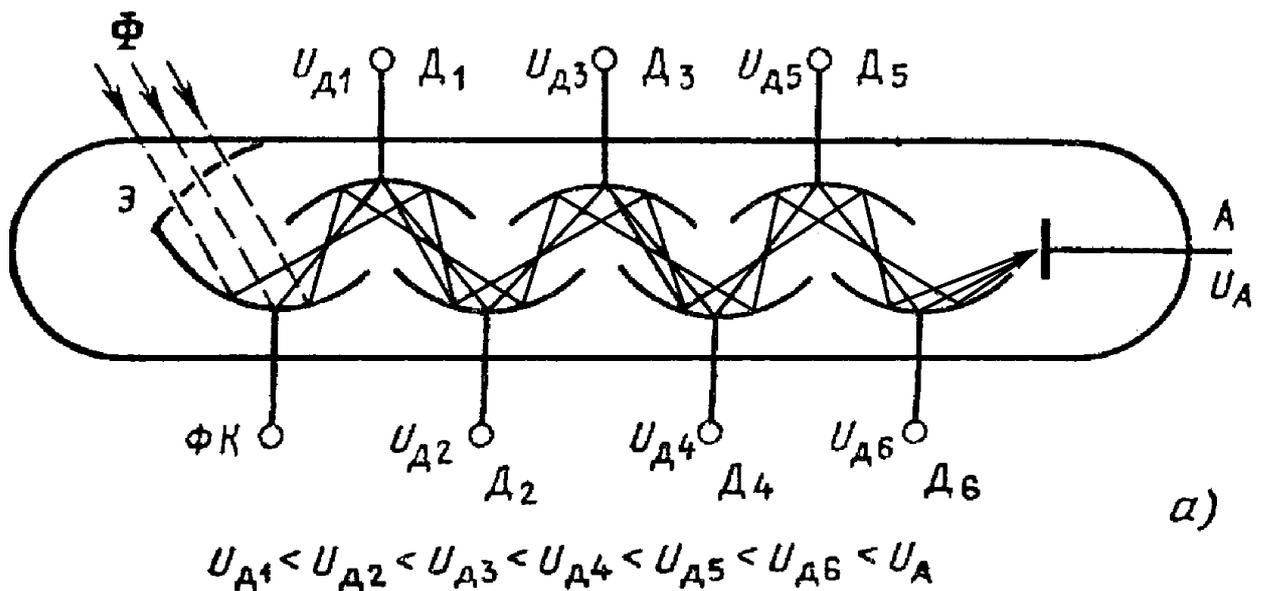


Рис.6

электроны n_k , которые после ускорения и фокусировки электродами Э (в ФЭУ, изображенном на Рис.6, вместо этих электродов использована только сетка Э), попадают на первый динод D_1 ⁵. Часть электронов теряется в фокусирующей и ускоряющей системе (сетка на Рис.6.а), что обычно учитывается с помощью коэффициента γ_k (γ_k - отношение числа фотоэлектронов на первом диноде D_1 к числу фотоэлектронов n_k), т.е. на первый динод поступит $n_k \gamma_k$ электронов. С поверхности первого динода выйдет в σ раз большее число электронов, чем на него упадет.

Появившиеся после бомбардировки первого динода вторичные электроны ускоряются полем второго динода D_2 и выбивают из него вторичные электроны, т.е. со второго динода уйдет в σ^2 раз большее число электронов и т.д. К аноду придет поток электронов в σ^m раз больший, чем было испущено катодом (m - число динодов). Количество электронов, попадающих на анод, можно вычислить по следующей формуле:

$$n_A = n_k \gamma_k \sigma_1 \gamma_1 \cdots \sigma_m \gamma_m = n_k \gamma_k \prod_{i=1}^m \sigma_i \gamma_i = n_k \gamma_k M$$

где γ_i - **эффективность каскада усиления** ($\gamma \sim 0,7 \dots 0,95$), равная отношению числа электронов, достигающих $(i+1)$ -го динода, к числу электронов, эмитированных $(i-m)$ -м динодом; σ_i - коэффициент вторичной эмиссии i -го динода; $\sigma_i \gamma_i$ - коэффициент усиления i -го каскада; m - число динодов.

Пользуясь выражением (4), нетрудно определить ток, протекающий в цепи анода:

$$I_a = \gamma_k M \cdot I_k$$

где M - **коэффициент усиления фотоэлектронного умножителя** по току; который равен $M = I_a / I_k$; I_k - ток фотоэмиссии с катода **ФК**.

Коэффициенты усиления и эффективности сбора γ_i электронов динодами зависят как от эмитирующей способности фотокатода и динодов, так и от конструкции входных камер и динодных систем.

Входная камера, как правило, состоит из фотокатода и электронно-оптической системы, обеспечивающей фокусирование потока фотоэлектронов в направлении первого динода. Фотокатод в зависимости от конструкции, и назначения ФЭУ может быть как полупрозрачным, расположенным в торце

⁵ **Динод** - это электрод с положительным потенциалом, обладающий большим коэффициентом вторичной эмиссии ($\sigma \sim 6 \dots 8$).

прибора, так и массивным при боковом входе оптического сигнала. Диаметры катодов достигают несколько десятков сантиметров, однако наиболее часто встречаются ФЭУ с размерами фотокатодов от 1,0 до 5 см.

Одним из основных требований, предъявляемым к электронно-оптическим системам ФЭУ, особенно быстродействующим, является требование минимального разброса времен пролета электронов от поверхности фотокатода до первого динода. Наилучшие результаты получаются во входных камерах со сферической формой электродов (Рис.6.а), где входная камера ФЭУ повторяет конструкцию каскада умножительной системы.

Динодные системы весьма разнообразны по конструкции. К ним предъявляются следующие требования: большое усиление и быстродействие, линейность энергетических (световых) характеристик, высокая эффективность, простота изготовления и эксплуатации. Наибольшее распространение получили динодные системы с электростатическими полями, обладающие наилучшими эксплуатационными характеристиками. Они могут быть разделены на системы:

- Системы с дискретными динодами. Наиболее распространены системы, использующие фокусировку электронов, и системы «сквозного» типа (жалюзи, сетки, пленки на «прострел»), в которых умножительные каскады сконструированы таким образом, что они не требуют специальной фокусировки электронных пучков.

Достоинства:

Малочувствительны к воздействию внешних магнитных полей, из-за развитой рабочей поверхности динодов обеспечивают работу при больших токах нагрузки.

Недостатки:

Низкая эффективность динодов, имеют большее временное разрешение по сравнению с ФЭУ, имеющими электростатическую фокусировку.

- Системы с распределенными динодами бывают трех типов: пластинчатые, щелевые и каналные.

Канальные распределительные диноды в простейшем случае представляют собой трубку с определенным калибром (отношение длины к диаметру), внутренняя поверхность которой обладает нужным электрическим сопротивлением и хорошим коэффициентом вторичной электронной эмиссии. Если на концы трубки (см. Рис.6.б) подать высокий потенциал, то в канале трубки сформируется однородное электрическое поле. Фотоэлектроны выбиваются с внутренней

поверхности трубки вторичные электроны, которые под действием электростатического поля ускоряются и бомбардируют стенки канала, находящиеся под большим потенциалом. Коэффициент усиления M трубки зависит от ее калибра, поверхности канала и приложенного к ее концам напряжения. Величина M достигает значений $10^5 \dots 10^6$. Канальные системы не требуют внешнего делителя напряжения, необходимого для систем на дискретных динодах, они имеют простую конструкцию и малые размеры.

В последние годы были разработаны гибридные ФЭУ, в которых в качестве умножающих элементов используются полупроводниковые диодные или транзисторные структуры. Их принцип действия основан на образовании свободных носителей в полупроводнике с р-п переходом при бомбардировке его электронами с энергией ~ 10 кэВ. На р-п переход подано обратное смещение. Образовавшиеся в результате бомбардировки электронно-дырочные пары разделяются полем р-п перехода, образуя ток в цепи анода. Коэффициент усиления пропорционален коэффициенту умножения носителей в полупроводнике и достигает величины 10^3 для диодных и 10^6 для транзисторных структур.

Гибридные ФЭУ имеют большие выходные токи ($\sim 0,5$ А в стационарном режиме и до 20 А в импульсном), малые габариты, высокое быстродействие ($\sim 10^{-10}$ с). Они не чувствительны к внешним магнитным полям.

Параметры и характеристики фотоэлектронных умножителей

В зависимости от вида регистрируемого сигнала в ФЭУ различают следующие параметры:

- **статические** при измерении световых немодулированных сигналов;
- **частотные** при работе с модулированными оптическими сигналами;
- **импульсные** для импульсных сигналов.

Коэффициент усиления динодной системы M и анодная токовая чувствительность S_{Ia} (Рис.7).

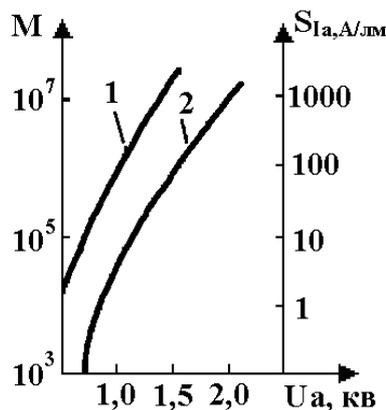


Рис.7

На Рис.7 кривая 1 относится к динодам с сурьмяно-цезиевым покрытием, а кривая 2 - к сплавным вторично-электронным эмиттерам. Увеличение M при росте напряжения питания вызвано возрастанием σ динодов. При большем числе динодов и прочих равных условиях наклон кривых увеличивается, то же

самое будет наблюдаться и при большом коэффициенте вторичной эмиссии динодов.

Анодную токовую чувствительность $S_{Ia} = dI_a/d\Phi$ [А/лм] измеряют при полном освещении поверхности катода и значениях световых потоков, соответствующих линейной части световой характеристики, при которых анодные токи I_a не превышают предельных значений.

Обычно величины световых потоков выбирают в диапазоне $10^{-4} \dots 10^{-8}$ лм.

Энергетические (световые) характеристики (Рис.8). Отклонение от линейности при больших Φ обусловлено влиянием пространственного заряда и утомлением фотокатода. При интенсивных световых потоках возникают большие плотности токов с фотокатода, что и приводит к формированию около его поверхности области объемного заряда, ограничивающего число электронов,

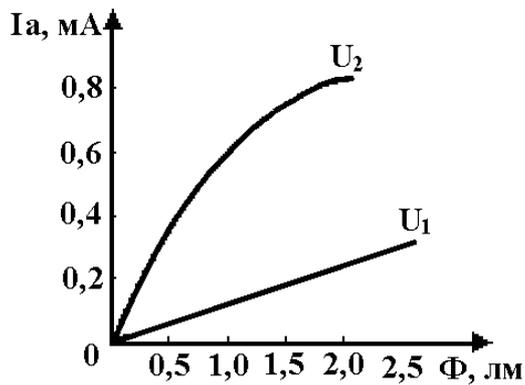


Рис.8

летающих в направлении первого динода.

При импульсных сигналах диапазон линейных режимов значительно шире.

При регистрации излучения, модулированного гармоническими сигналами, инерционность оценивается с помощью частотной характеристики. Различные типы умножителей работают в частотном диапазоне от 15 до 150 МГц.

ФЭУ, предназначенные для регистрации коротких вспышек слабой интенсивности, должны иметь хорошие быстродействие ($\sim 10^{-3} \dots 10^{-10}$ с) и чувствительность. Способность ФЭУ выделять световые импульсы, незначительно различающиеся по интенсивности, характеризуется **собственным амплитудным разрешением фотоэлектронного умножителя**, которое тем выше, чем ниже уровень собственных шумов ФЭУ. Минимальные значения (нижний порог) интенсивности измеряемых потоков излучения определяются темновым током (дается в справочниках для определенного режима работы ФЭУ) и шумами (флуктуации темнового тока служат источниками собственных шумов ФЭУ, к которым добавляются шумы, вносимые динодами).

Темновой ток ФЭУ обусловлен термо и автоэмиссией с поверхности фотокатода и динодов, токами утечки между электродами прибора.

Быстродействие ФЭУ оценивается по форме импульса на его выходе при освещении всей поверхности фотокатода световым импульсом с длительностью

$3 \cdot 10^{-9}$ с. На основе анализа формы выходного импульса определяют следующие импульсные параметры:

τ_{ϕ} - длительность фронта анодного импульса тока, которая измеряется между уровнями 0,1 и 0,9 от амплитудного значения импульса I_{am} ;

$\tau_{0,5}$, $\tau_{0,1}$ - соответственно длительности выходных импульсов на уровне $0,5I_{am}$ и $0,1I_{am}$;

$S=0,8 (I_{am}/\tau_{\phi})$ - крутизна фронта импульса.

В соответствии с назначением все ФЭУ можно разделить на две большие группы:

1) низкочастотные ФЭУ для измерения предельно малой интенсивности световых потоков;

2) импульсные и высокочастотные ФЭУ для регистрации кратковременных и быстро изменяющихся малых потоков излучения.