

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ФОТОЭЛЕКТРОННОГО УМНОЖИТЕЛЯ

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) относится к фотоэлектрическим приемникам оптического излучения, в которых энергия поглощенного фотона переходит в энергию электронов. ФЭУ представляет собой совокупность помещенных в вакуумную камеру фотокатода, системы динодов и анода.

Фотокатод, по сути, является приемником фотонов и преобразователем потока фотонов в поток электронов. Такое преобразование основано на явлении фотоэффекта. Фотокатод представляет собой слой фоточувствительного материала, нанесенного на непрозрачную или прозрачную подложку. Толстые непрозрачные слои освещаются со стороны вакуума, а тонкие полупрозрачные пленки, нанесенные на прозрачную подложку, могут освещаться как со стороны вакуума, так и со стороны подложки. Фотокатоды для видимой, ИК- и ближней УФ-областей спектра имеют в своем составе (или на поверхности) щелочные металлы, вступающие в реакцию с атмосферным воздухом. Поэтому фотокатоды работают только в условиях вакуума.

Основными параметрами фотокатодов являются

- спектральная чувствительность (S);
- длинноволновая граница фотоэлектронной эмиссии (λ_0);
- квантовый выход фотоэлектронной эмиссии ($Y(\lambda)$);
- интегральная чувствительность (S_i);
- плотность темнового тока (j_T).

Длинноволновая граница фотоэлектронной эмиссии (порог чувствительности фотокатода) – длина волны, при которой $S_{\lambda_0} = 0,01 \cdot S$.

Спектральная чувствительность – отношение фотоэлектронного тока в режиме насыщения (в мА) к мощности падающего на фотокатод монохроматического излучения с длиной волны λ (в Вт).

Квантовый выход фотоэлектронной эмиссии – отношение числа эмитированных электронов к числу падающих на фотокатод фотонов:

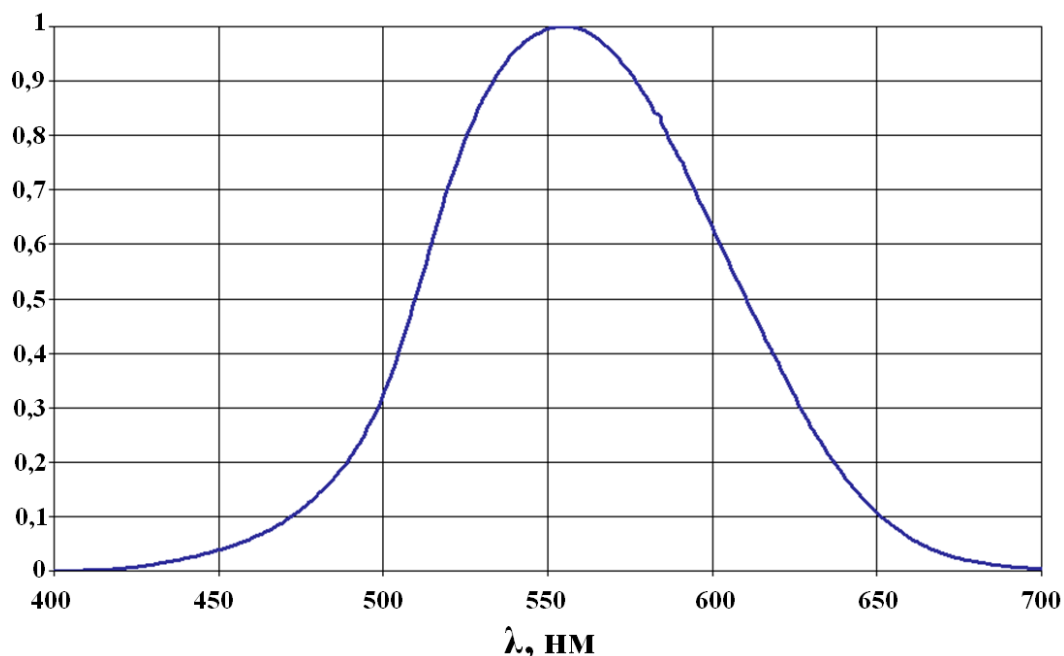
$$Y(\lambda) = 1,24 \left[\frac{\text{Вт} \cdot \text{нм}}{\text{мА}} \right] \cdot \frac{S_\lambda}{\lambda [\text{нм}]}.$$

Квантовый выход часто выражается в процентах.

Интегральная чувствительность фотокатода – отношение фототока в режиме насыщения (в мкА) к величине падающего светового потока (в лм) от стандартного источника излучения (лампа накаливания с вольфрамовой нитью при $T = 2850 \text{ K}$). S_i и S связаны соотношением:

$$S_i = 10^3 \cdot \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_2} S \cdot F_\lambda d\lambda}{F_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda K_\lambda d\lambda},$$

где F_λ – интенсивность излучения на длине волны λ ; K_λ – относительная спектральная чувствительность человеческого глаза (кривая видности – см. рисунок); λ_0 – порог чувствительности фотокатода; λ_1 и λ_2 – границы видимого диапазона длин волн электромагнитного излучения ($\lambda_1 = 350 \text{ нм}$; $\lambda_2 = 750 \text{ нм}$); $F_0 = 683 \text{ лм/Вт}$ – световой поток (в лм), соответствующий потоку в 1 Вт монохроматического излучения с $\lambda = 554 \text{ нм}$.



Кривая видимости человеческого глаза

Темновой ток фотокатода — ток в отсутствие излучения, определяемый термоэлектронной эмиссией. Она зависит от состояния поверхности фотокатода (работы выхода фотокатода) и его температуры. Темновой ток является основным источником электрического шума в ФЭУ. Среднеквадратичный электрический шум ($i_{\text{ш}}$) в отсутствие излучения равен $i_{\text{ш}} = 2 \cdot e \cdot j_T \cdot q \cdot \Delta f$, где e — заряд электрона; j_T — плотность темнового тока; q — площадь фотокатода; Δf — ширина полосы частот регистрирующего устройства.

Фотокатод также характеризуется стабильностью его чувствительности во времени и термостойкостью, т. е. диапазоном рабочих температур, в границах которого чувствительность фотокатода сохраняется в заданных пределах.

Указанные параметры зависят от материалов поверхностного слоя фотокатода (см. таблицу 1).

Таблица 1 — Основные параметры фотокатодов

№ п/п	Материал фотокатода	S , мкА/лм	$Y(\lambda)$	j_T , А/см ²
1.	Cs ₃ Sb	40–80	0,15–0,25	10^{-16} – 10^{-15}
2.	Na ₂ KSb	30–60	0,25–0,3	10^{-17}
3.	Cs	200–700	0,3–0,35	10^{-16}
4.	K ₂ CsSb	100–200	0,3–0,35	10^{-17}
5.	Ag–O–Cs	20–70	0,005	10^{-12} – 10^{-11}
6.	Bi–Ag–O–Cs	30–80	0,1	10^{-14}
7.	GaAsP–Cs–O	200–300	0,5	10^{-16} – 10^{-14}
8.	GaAs–Cs–O	1000–2000	0,3	10^{-12} – 10^{-11}
9.	InGaAsP–Cs–O	200–1000	0,2	10^{-15}
10.	InGaAs–InP–Ag–Cs–O	400–1000	0,01–0,08	10^{-16}

В системе динодов выполняется умножение электронов. Работа динода основана на эффекте вторичной электронной эмиссии — явления, когда первичный электрон, попадая на динод, выбивает несколько электронов (называемых вторичными). Сколько в среднем появляется вторичных электронов, зависит и от энергии первичного электрона и от материала динода. Эта величина называется коэффициентом вторичной эмиссии (δ).

Чтобы вылетевший из фотокатода фотоэлектрон пришел на 1-ый динод, имея достаточную энергию, потенциал динода должен быть в среднем на 150 В выше

потенциала фотокатода. Аналогично, чтобы появившиеся с 1-ого динода примерно δ вторичных электронов достигли следующего 2-ого динода, обладая достаточной энергией, потенциал 2-ого динода также должен превышать потенциал 1-ого в среднем на 150 В. В результате, со 2-ого динода выходит электронное облако из примерно δ^2 электронов. Процесс умножения происходит лавинообразно и с последнего динода на анод (или электрод-коллектор) приходит уже $G = \delta^m$ электронов, где m – число динодов.

Согласно ГОСТ 11612.0–75, для стабилизации напряжения между динодами ФЭУ используются конденсаторы, шунтирующие последние диноды ФЭУ. Значения емкости таких конденсаторов рассчитывают по формуле:

$$C_i = 100 \cdot \frac{Q}{\delta^{n-i} U_i},$$

где Q – заряд анодного тока, Кл; n – общее число каскадов; U_i – напряжение на i -м каскаде (между i -м и $(i-1)$ -м динодами); 100 – коэффициент, вводимый в предположении допустимого изменения междинодного напряжения не более 1 %.

Задача 1. Сила тока на выходе ФЭУ составляет I мА. Определить количество фотонов, поступивших на его фотокатод в течение t с, если материал фотокатода – M , количество динодов ФЭУ – n , а величина их коэффициента вторичной эмиссии – δ .

Задача 2. Определить потенциал на n -м диноде ФЭУ, если потенциал на его фотокатод равен U В.

Задача 3. Определить длинноволновую границу фотоэлектронной эмиссии фотокатода, изготовленного из материала M .

Задача 4. Определить интегральную чувствительность фотокатода на длине волны $1,5 \cdot \lambda_0$, изготовленного из материала M .

Задача 5. Определить величину среднеквадратического электрического шума ФЭУ, если площадь фотокатода q , см².

Задача 6. Рассчитать для условий задачи 1 интенсивность воздействующего на фотокатод излучения, значение длины волны которого равно рассчитанному в задаче 3 значению длинноволновой границы фотоэлектронной эмиссии фотокатода, изготовленного из материала M *.

Задача 7. Рассчитать значения емкости конденсаторов, шунтирующих предпоследний динод ФЭУ из задачи 1.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета

№ варианта**	I	t	M	n	δ	U	q
0	9	0,5	1	9	10	50	2
1	10	1	2	10	11	55	2,5
2	11	1,5	3	11	12	60	3
3	12	2	4	12	13	65	3,5
4	13	2,5	5	13	14	70	4
5	14	3	6	14	15	75	4,5
6	15	3,5	7	15	16	80	5
7	16	4	8	16	17	85	5,5
8	17	4,5	9	17	18	90	6
9	18	5	10	18	19	95	6,5

* Энергия одного фотона равна $h \cdot c / \lambda$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж/с – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме.

** № варианта = (Последние 2 цифры в номере зачетной книжки) mod 10