

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Н. О. ЧЕЧИК

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ФОТОМЕТРИРОВАНИЕ ВЕСЬМА СЛАБЫХ
СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНО-ЭЛЕКТРОННОГО
УСИЛЕНИЯ**

(Представлено академиком А. А. Лебедевым 13 XI 1946)

1. Измерение и обнаружение весьма слабых световых потоков являются в настоящее время актуальной задачей при выполнении научно-исследовательских работ в области комбинационного рассеяния света, исследования яркости люминофоров, прожекторного зондирования атмосферы, астрофизики, а также в ряде других областей науки и техники.

Объективные фотоэлектрические методы измерения в настоящее время успешно конкурируют с другими методами измерений. Применение фотоэлементов в ряде случаев уже недостаточно, так как оно ограничивает пороговую чувствительность фотоэлектрических фотометров. Кроме того, известные ограничения накладываются величиной коэффициента усиления усилителя фототока.

Применение фотоумножителей (вторично-электронных умножителей с фотокатодами) позволяет при определенных условиях измерять и обнаруживать более слабые световые потоки.

2. Пороговая чувствительность фотоэлектрического прибора характеризуется той наименьшей величиной светового потока, которая еще может быть уверенно обнаружена. Эта величина зависит от отношения напряжения сигнала к напряжению помехи. В зависимости от того, обнаруживается или измеряется световой поток, и в зависимости от степени точности измерения это отношение колеблется в широких пределах.

Основными источниками помех являются электрические флуктуации (1), обусловленные дробовым эффектом фототока и темнового тока фотоэлемента или фотоумножителя, и термическим эффектом нагрузочного сопротивления R . Выражая в дБ (2)

$$\rho_{\text{дб}} = 10 \lg \left(\frac{v_c^2}{\overline{v_n^2}} \right), \quad (1)$$

где v_c — напряжение сигнала, а $\overline{v_n^2}$ — средний квадрат напряжения помехи, получим для фотоэлементной схемы в случае усиления постоянного фототока

$$\rho_{\text{дб}} = -10 \lg (f_2 - f_1) - 10 \lg \left(\frac{2e}{I_{\text{фк}}} + \frac{4kT}{RI_{\text{фк}}^2} + \frac{2eI_{\text{тк}}}{I_{\text{фк}}^2} \right). \quad (2)$$

В случае усиления постоянного фототока фотоумножительной схемой получим

$$\rho_{db} = -10 \lg(f_2 - f_1) - 10 \lg \left[\frac{2e(1+B)}{I_{\text{фк}}} + \frac{4kT}{RM^2 I_{\text{фк}}^2} + \frac{2e(1+B)}{M^2 I_{\text{фк}}^2} \sum_d M_d I_{Td} \right], \quad (3)$$

где $I_{\text{фк}}$ — фототок фотокатода, $I_{\text{Тк}}$ — термоток фотокатода, I_{Td} — термоток фотоумножителя, обусловленный термоэмиссией, возникшей с каскада d , M — полный коэффициент усиления фотоумножителя, M_d — коэффициент усиления фотоумножителя, начиная с каскада d , $e = 1,59 \cdot 10^{-19}$ А · сек⁻¹, $k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ В · сек · град⁻¹, $T \approx 300^\circ \text{К}$, B — постоянная фотоумножителя (2), $(1+B) \approx 2,5$, $f_2 - f_1$ — спектр усиливаемых частот.

Анализ выражения (2) показывает, что в случае фотоэлементной схемы наибольшее понижение порога имеет место при $R = 10^{13} \Omega$ (3). Дальнейшее повышение R ограничивается существенным возрастанием постоянной времени фотоэлементной схемы, а также рядом других причин. Анализ выражения (3) показывает, что в случае фотоумножительной схемы пороговая чувствительность существенно зависит от величины темнового тока фотоумножителя.

Наибольшее понижение порога имеет место при отсутствии темнового тока (термотока), что достигается, в частности, охлаждением фотоумножителя (4). В этом случае уже при

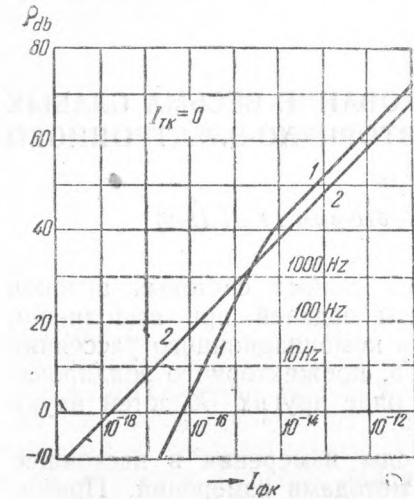


Рис. 1. Зависимость пороговой чувствительности от фототока фотокатода. 1 — для фотоэлемента, $R = 10^{13} \Omega$. 2 — для фотоумножителя, $M = 10^5$, $R = 10^3 \Omega$

$R = 10^5 \Omega$ пороговая чувствительность определяется исключительно дробовым эффектом фототока. Как видно из рис. 1, на котором показана зависимость $\rho_{db} = \varphi(I_{\text{фк}})$, по мере сужения спектра частот $f_2 - f_1$ все более сказывается преимущество фотоумножительной схемы.

3. Измеряемый поток F вызывает в нагрузочном сопротивлении R фотоумножителя ток

$$I_{\text{ф}} = \gamma_{\text{фк}} M F = \gamma F,$$

где $\gamma_{\text{фк}}$ — чувствительность фотокатода, γ — чувствительность всего фотоумножителя.

При весьма слабых потоках фототок $I_{\text{ф}}$ столь мал, что не может быть обнаружен обычными гальванометрами и должен быть усилен в k раз.

Применяя усилитель постоянного тока с компенсацией постоянной составляющей анодного тока лампы, получим $k = S_d R \approx S R$, где S — статическая крутизна лампы, S_d — динамическая крутизна лампы, R — нагрузочное сопротивление фотоумножителя, являющееся одновременно входным сопротивлением усилителя.

При измерении одного и того же весьма слабого светового потока величина коэффициента усиления k , необходимого при пользовании фотоумножительной схемой, на несколько порядков меньше таковой величины для фотоэлементной схемы. Это приводит к тому, что вместо электрометрических ламп и зеркального гальванометра, необходимых при фотоэлементной схеме (5), в случае фотоумножительной схемы можно, как это показано ниже, воспользоваться обычными

высокочастотными пентодами и стрелочным гальванометром. Постоянная времени фотоумножительной схемы, при определенных условиях, может быть во много раз меньше постоянной времени фотоэлементной схемы.

4. Точность измерений. Включенный на выходе фотоумножительной схемы гальванометр измеряет усиленный фототок

$$I_1 = \gamma S R F. \quad (4)$$

Если $\gamma R S = \text{const}$, то ток I_1 зависит линейно от потока F , а следовательно, шкала гальванометра прямо пропорциональна измеряемому потоку.

Точность измерения тем выше, чем меньше величина $\frac{dI_1}{I_1}$. Беря отношение полного дифференциала dI_1 к величине I_1 , получим при $F = \text{const}$

$$\begin{aligned} \frac{dI_1}{I_1} = & \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial U} dU + \\ & + \frac{\alpha}{1 + \alpha T} dT + 10 \frac{dU_n}{U_n} - \\ & - \frac{D dU_a}{DU_a + U_c} - \frac{dU_c}{DU_a + U_c}, \quad (5) \end{aligned}$$

где U — напряжение фотоумножителя, U_n — напряжение накала усилителя, U_a — напряжение анода усилителя, U_c — напряжение сетки усилителя, α — температурный коэффициент сопротивления R , T — температура сопротивления R , D — проницаемость лампы.

5. В основу созданного нами вторично-электронного фотоэлектрического фотометра весьма слабых световых потоков положена схема, показанная на рис. 2.

Фотометр работает на магнитной трубке Кубецкого (6), обладающей $[\text{Ag} - \text{O} - \text{Cs}]$ фотокатодом и $[\text{Cu} - \text{S} - \text{Cs}]$ эмиттерами. Для получения интегральной чувствительности в 30 A/lm при $U = 1000 \text{ V}$ применен добавочный магнит, расположенный вблизи фотокатода.

В анодной цепи фотоумножителя расположено нагрузочное сопротивление величиной в $2 \cdot 10^9 \Omega$.

Усилитель тока собран по схеме Брентано (7), усовершенствованной Винн-Вильямсом (8), на лампах RCA-1851. Данная схема позволяет существенно снизить влияние изменения питающих напряжений на точность измерений. Питание фотометра осуществляется через выпрямители от сети переменного тока. Напряжение, питающее фотоумножитель, стабилизируется катодным стабилизатором. Анодное

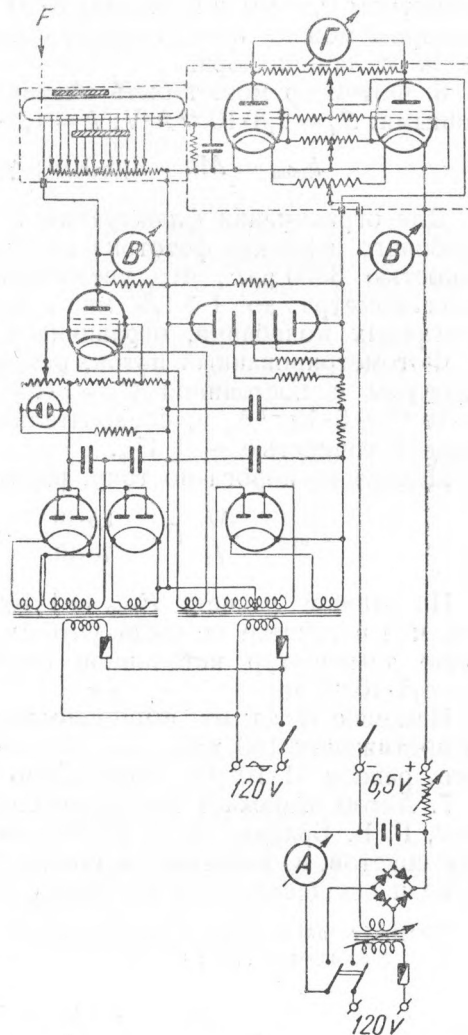


Рис. 2. Схема фотоэлектрического фотометра весьма слабых световых потоков

напряжение усилителя стабилизируется неоновым стабилизатором. Напряжение накала стабилизируется буферным аккумулятором.

Понижение темнового тока осуществляется путем охлаждения фотокатода. Для этого в сосуд Дьюра, наполненный жидким воздухом, погружен медный стержень, по которому холод поступает внутрь арматуры трубки, вызывая понижение температуры фотокатода до -90°C . Конструкция системы охлаждения обеспечивает минимальную потерю энергии на излишнее охлаждение самой арматуры, герметичность и светонепроницаемость арматуры и высокое качество изоляции вывода анода. Внутри арматуры помещен поглотитель влаги. Фотометр работает по методу непосредственного отсчета, что крайне упрощает технику измерения.

Для контроля постоянства чувствительности фотометра внутри оптической камеры располагается люминофор постоянного действия диаметром 0,5 мм и яркостью $8 \cdot 10^{-7}$ Sb. Специальным электрическим затвором можно вместо измеряемого потока подать на фотокатод поток от люминофора.

6. Фотометр может быть охарактеризован следующими основными данными: $S_d = 1,8 \cdot 10^{-4}$ A/V; $k = 1,8 \cdot 10^5$;

$$k_{\text{общ}} = Mk = 3,6 \cdot 10^{11}; \gamma_{\text{общ}} = \gamma k = 5,4 \cdot 10^6 \text{ A/lm.}$$

Для ограничения флюктуаций темнового тока и, главным образом, дробового эффекта фототока параллельно R включен конденсатор C емкостью $3200 \mu\text{F}$, что, увеличивая время установления показаний гальванометра до $1 \div 1,5$ мин., существенно уменьшает амплитуду хаотичных колебаний, ограничивая их величиной $1,5 \cdot 10^{-7}$ A.

Фотометрированный поток, равный $4,5 \cdot 10^{-11}$ lm, измерялся гальванометром с постоянной $C_i = 1 \cdot 10^{-6}$ A/1°. Измеренный ток составил $70 \cdot 10^{-6} \pm 5 \cdot 10^{-7}$ A, и, следовательно, поток был измерен с относительной точностью $\sim \pm 1\%$.

Исходя из порога по току, равного $1,5 \cdot 10^{-7}$ A, можно считать

$$F_{\text{пор}} = \frac{\Delta I_1}{I_1} F = \frac{1,5 \cdot 10^{-7}}{70 \cdot 10^{-6}} \cdot 4,5 \cdot 10^{-11} = 1 \cdot 10^{-13} \text{ lm.}$$

По данным расчета $F_{\text{пор}} = 1 \cdot 10^{-14}$ lm. Расхождение объясняется тем, что в расчете не были учтены влияние тока сетки лампы и различие температур источников света при определении γ и потока $F = 4,5 \cdot 10^{-11}$ lm.

Измеряя поток от вышеупомянутого люминофора несколько раз на протяжении 150 мин., мы получили ток I_1 , среднее значение которого, равное $41 \cdot 10^{-6}$ A, определено с точностью $\pm 2\%$.

7. Автор выражает глубокую благодарность академику А. А. Лебедеву, Г. В. Брауде, Л. А. Кубецкому и В. Б. Никонову за ряд ценных советов и указаний, а также О. Г. Кваша за работу по разработке и осуществлению системы охлаждения.

Институт автоматики и телемеханики
Академии Наук СССР

Поступило
13 XI 1946

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. Л. Грановский, Электрические флюктуации, ОНТИ, 1936. ² R. C. Wipans and J. R. Piers, Rev. Sci. Instr., **12**, 5, 269 (1941). ³ E. A. Johnson, W. H. Mock and R. E. Hopkins, J. Opt. Soc. Am. **29**, 12, 506 (1939). ⁴ Z. Bay. Z. Physik, **117**, 3, 4, 227 (1941). ⁵ В. Никонов и П. Куликовский, Астрон. журн., **16**, 4, 54 (1939). ⁶ Л. А. Кубецкий, Изв. АН СССР, Сер. физ., **8**, 6, 357 (1944). ⁷ J. C. M. Brentano, Nature, **108**, 532 (1921). ⁸ С. Е. Уупп-Уильямс, Proc. Cambridge Soc. **23**, 811 (1927).