

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ - ОНФ -- 89 - 98

И Ф В Э 89-98
ОНФ

Л.Л.Курчанинов, В.В.Сушков, Р.С.Шувалов

ШУМ ТЕМНОВОГО ТОКА И ФОТОТОКА
В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ $3 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-1}$ Гц

Направлено в ПТЭ

Серпухов 1989

Аннотация

Курчанинов Л.Л. и др. Шум темнового тока и фототока в диапазоне частот $3 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-1}$ Гц: Препринт ИФВЭ 89-98. - Серпухов, 1989. - 8 с., 4 рис., 1 табл., библиогр.: 13.

Показано, что спектральные плотности темновых токов ФЭУ-140, ФЭУ-85, ФЭУ-87 в диодном включении имеют характер $1/f$.

Обнаружено, что флуктуации мгновенных значений темнового тока и фототока ФЭУ-140 в области частот, где доминирует фликкер-шум, очень далеки от гауссовых, а в области высоких частот - гауссовы, но с дисперсией, отличающейся от таковой для пуассоновского потока фотоэлектронов.

Abstract

Kurchaninov L.L. et al. The Dark Current and Photocurrent Noise in the $3 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-1}$ Hz Frequency Bandpass Region: IHEP Preprint 89-98. - Serpukhov, 1989. - p. 8, figs. 4, table 1, refs.: 13.

The dark current spectral density of phototubes FEU-140, FEU-85, FEU-87 in the photodiode arrangement is shown to be of $1/f$ character. The instantaneous fluctuations of the dark current and photocurrent in phototube FEU-140 in the bandpass, where flicker noise is dominating, are found to be far from Gaussian. They are Gaussian in the higher frequency bandpass, but with the dispersion differing from that of the Poissonian random process.

Известно, что для измерения интенсивности постоянных или медленно изменяющихся во времени световых потоков целесообразно использовать метод счета одноэлектронных импульсов (ОЭИ)/1/. Диапазон измерения ограничен сверху просчетами ОЭИ из-за их наложений. Когда последняя ошибка становится большой, приходится прибегать к измерениям интеграла тока. Для уменьшения ошибки, связанной с дрейфом коэффициента усиления ФЭУ, либо снижают напряжение питания, либо замыкают накоротко несколько последних диодов и анод. Идеальный вариант - использовать фотодиод или ФЭУ в диодном включении, но тогда необходимо применять малошумящие усилители и иметь информацию о шумовых характеристиках фотоприемника при низких частотах.

Обычно считается, что шум фотодиода вызывается термо- и автоэмиссией, люминесценцией стекла и т.п., т.е. белым в области сколь угодно низких частот. С другой стороны, известно, что в области низких частот всегда наблюдается избыточный шум со спектральной плотностью $S \sim f^{-1}$. Это явление носит столь универсальный характер (см., например, обзоры/2-6/), что обязано проявляться в фотодиоде. Вопрос в том, при каких частотах $f_{гр}$ фликкер-шум начинает доминировать над белым. Во многих приложениях ответ на этот вопрос очень важен: не имеет смысла увеличивать время интегрирования до величины $T > f_{гр}^{-1}$, так как при больших T статистическая ошибка практически не уменьшается, а аппаратурная (дрейф) возрастает.

В работе/7/ при измерении шума электрометрического усилителя мы решили использовать в качестве эталона белый дробовый шум фототока. Неожиданно для себя мы обнаружили, что как темновой ток, так и фототок ФЭУ-140 в диодном включении имеют спектральную плотность $S \sim f^{-1}$ уже при частоте $\leq 0,1$ Гц, которую априори мы считали достаточно высокой.

Библиографический поиск показал, что исследования спектральной плотности темнового тока и фототока проводились, но результаты противоречивы. Так, в^{8/} наблюдался фликкер-шум фотодиода при $f < 1$ Гц и токе $\sim 10^{-7}$ А. В^{9,10/} (цитируется по^{8/}) фликкер-шум не был обнаружен. В^{11/} измерялись флуктуации анодного тока ФЭУ РСА 5919. В диапазоне частот $1-10^5$ Гц наблюдался белый шум со спектральной плотностью, пропорциональной анодному току. Авторы^{11/} предполагали, что должен существовать фликкер-шум фототока, обусловленный флуктуациями работы выхода, причем его вклад ожидался пропорциональным $(\bar{I})^2$. В^{12,13/} предложена следующая модель фликкер-шума фотодиода. Электроны ускоряются в электрическом поле и испускают низкочастотное тормозное излучение, которое, взаимодействуя с электроном, приводит к появлению фликкер-шума во внешней цепи. В^{4/} экспериментальные данные для ФЭУ 931 А сравниваются с расчетом по теории Ханделя. Отмечается, что согласие хорошее, но, по мнению авторов, вопрос, тем не менее, требует дальнейшего изучения. Согласно модели^{12,13/} спектральная плотность фликкер-шума пропорциональна $S \sim (\bar{I})^2 U^{3/2}$, где \bar{I} – средний ток фотокатода, U – напряжение анод-катод, поэтому, чтобы наблюдать эффект^{4/}, измерения проводились при очень, на наш взгляд, больших фототоках: $I \sim 3$ мкА. В^{7/} мы наблюдали фликкер-шум при $I \approx 10^{-15}$ А и $U=9$ В. Если подставить эти значения в формулу Ханделя, то получим, что ожидаемый эффект должен быть на несколько порядков величины меньше, чем наблюдаемый в^{7/}.

Исходя из вышеизложенного, мы решили провести измерения спектральной плотности шума темнового тока и фототока ФЭУ-85, ФЭУ-87, ФЭУ-140 в диодном включении.

Результаты измерений для темнового тока приведены на рис.1. Методы измерений и обработки результатов те же, что и в^{7/}. Можно видеть, что для всех трех типов ФЭУ наблюдается фликкер-шум. Спектральные плотности разных типов могут отличаться по величине на несколько порядков, и даже для двух экземпляров ФЭУ-85 – на порядок величины. Следовательно, если по условиям эксперимента необходимо использовать метод измерения интеграла тока и при этом требуется большое время интегрирования, то следует тщательно отбирать ФЭУ или фотодиоды по уровню фликкер-шума. Это тем более затруднительно, что в литературе таких данных нет. Наименьший фликкер-шум среди измеренных (рис.1) имеет ФЭУ-140, поэтому мы изучили его более подробно.

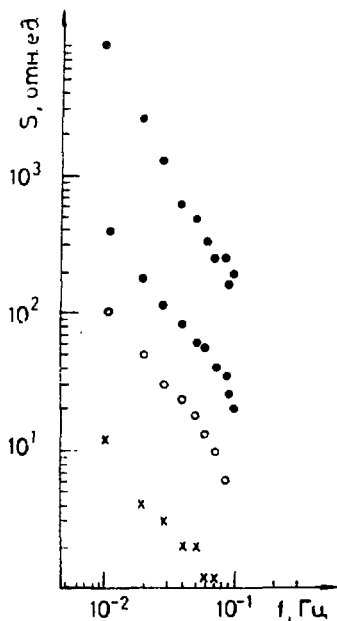


Рис.1.
Спектральные плотности темнового тока для двух экземпляров ФЭУ-85 (темные точки); ФЭУ-87 (светлые точки) и ФЭУ-140 (крестики).

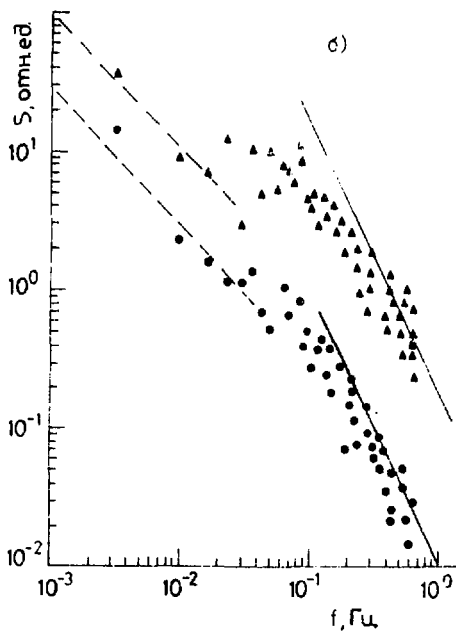
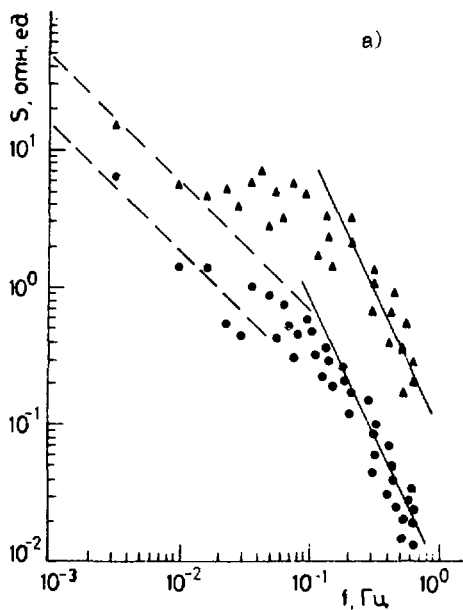


Рис.2. Спектральные плотности темнового тока (а) и фототока (б) при напряжении анод-катод 9 В (кружки) и 300 В (треугольники).

Результаты измерений спектральной плотности темнового тока и фототока приведены соответственно на рис.2а и 2б. Можно видеть, что:

- при увеличении напряжения анод-катод с 9 до 300 В в диапазоне частот $\gg 2 \cdot 10^{-2}$ Гц белый шум становится доминирующим; полюс усилителя находится при $f \approx 10^{-1}$ Гц; выше этой частоты спектральные плотности имеют наклон 40 дБ/декаду, как и должно быть для белого шума;

- спектральная плотность темнового тока при 300 В почти на порядок выше, чем при 9 В.

Амплитудные распределения (в дальнейшем - распределения мгновенных значений случайного процесса) приведены на рис.3а и 4а. Время выборки АЦП - $40 \cdot 10^{-3}$ с, число выборок - 1024, время измерения $T = 3072$ с. Видно, что распределения явно не гауссовы. Чтобы выяснить, в какой области частот возникает отклонение от нормального распределения, временные ряды показаний АЦП при обработке были пропущены через идеальные низкочастотные и высокочастотные фильтры, а затем для обеих частей спектра вновь построены распределения мгновенных значений. Для низкочастотной области (первые 6 гармоник временного ряда) эти распределения показаны на рис.3б и 4б, для высокочастотной (7-я гармоника и выше) - на рис.3в и 4в. Видно, что вся "негауссовость" лежит в области фликкер-шума.

Аналогичные распределения были получены для напряжения катод-анод 9 В. Мы их не приводим, так как, во-первых, они очень похожи на распределения рис.3,4 и, во-вторых, судить о близости распределения к нормальному можно по величинам хи-квадрат, которые приведены в таблице. Там же приведены средние значения, стандартные отклонения и числа степеней свободы.

Анализ данных, приведенных на рис.2,3 и в таблице, приводит к ряду вопросов.

I. Почему при увеличении напряжения от 9 до 300 В сильно возрастают спектральные плотности и дисперсии? Заметим, что разности $\bar{A}_{\text{ф.т.}} + \bar{A}_{\text{т.т.}} - \bar{A}_{\text{т.т.}}$ равны соответственно $2343 - 600 = 1743$ и $3568 - 1805 = 1763$, т.е. фототок уже при 9 В выходит на плато. Естественно предположить, что возрастание как абсолютных, так и относительных дисперсий связано с возрастанием энергии электронов. Гипотезу о том, что при $U=300$ В становится существенной вторичная эмиссия, нужно отвергнуть, так как электроны, покидающие диод, должны вновь возвратиться на него, т.е. средний

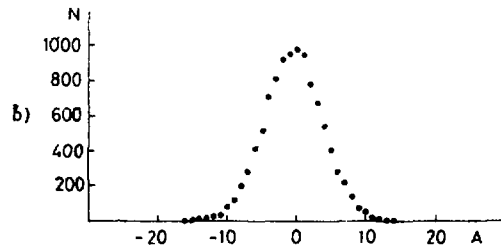
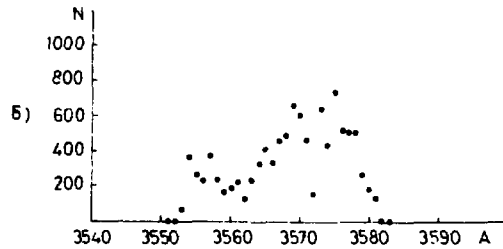
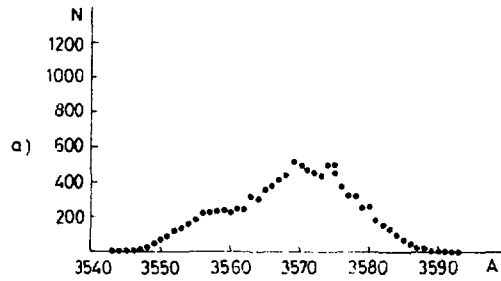
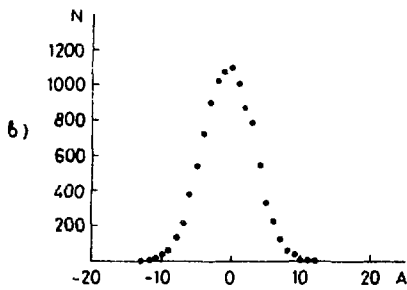
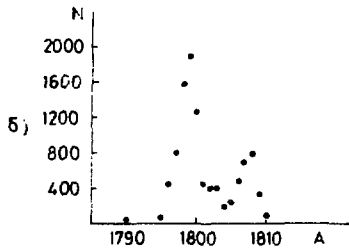
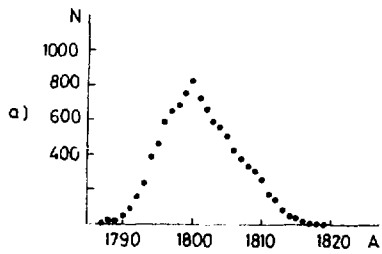


Рис.3.
 Распределения мгновенных значений темнового тока в области частот $0-3 \cdot 10^{-1}$ Гц (а); $0-1,8 \cdot 10^{-2}$ Гц (б) и $2,1 \cdot 10^{-2}-3 \cdot 10^{-1}$ Гц (в).
 Напряжение анод-катод 300 В.

Рис.4.
 Распределения мгновенных значений фототока в области частот $0-3 \cdot 10^{-1}$ Гц (а); $0-1,8 \cdot 10^{-2}$ Гц (б) и $2,1 \cdot 10^{-2}-3 \cdot 10^{-1}$ Гц (в).
 Напряжение анод-катод 300 В.

ток от электронов вторичной эмиссии должен быть равен нулю, а спектральная плотность $s \sim f^2$. Но в таком случае спектральные плотности в области высоких частот при 9 и 300 В должны бы сильно различаться, однако этого не наблюдается, т.е. количественно эффект мал.

Таблица. Средние значения темнового тока $\bar{A}_{т.т.}$ и суммы темнового тока и фототока $\bar{A}_{т.т.+ф.т.}$, стандартные отклонения $\sigma_{т.т.}$ и $\sigma_{т.т.+ф.т.}$, значения хи-квадратов χ^2 и числа степеней свободы (все измеряется в числе отсчетов АЦП) при напряжении катод-анод $U=9$ В и $U=300$ В для трех диапазонов частот

		U = 9 В				U = 300 В			
		$\frac{\bar{A}_{т.т.}}{\bar{A}_{т.т.+ф.т.}}$	$\frac{\sigma_{т.т.}}{\sigma_{т.т.+ф.т.}}$	χ^2	ν	$\frac{\bar{A}_{т.т.}}{\bar{A}_{т.т.+ф.т.}}$	$\frac{\sigma_{т.т.}}{\sigma_{т.т.+ф.т.}}$	χ^2	ν
Темновой ток (т.т.)	Все частоты	600	1,90	92,7	12	1805	5,4	333	35
	Нижние	600	1,52	1136	6	1805	4,0	5718	14
	Верхние	0	1,10	5,52	7	0	3,56	27	24
Темновой ток + фототок (т.т.+ф.т.)	Все частоты	2343	3,70	2786	20	3568	8,58	443	49
	Нижние	2343	3,50	5104	14	3568	7,44	2416	27
	Верхние	0	1,12	14,7	9	0	4,23	27	31

2. При $U=9$ В выполняется соотношение

$$\frac{\sigma_{т.т.+ф.т.}}{\sigma_{т.т.}} = \left(\frac{\bar{A}_{т.т.+ф.т.}}{\bar{A}_{т.т.}} \right)^{1/2} \quad \text{или} \quad \frac{3,70}{1,90} \approx \sqrt{\frac{2443}{600}}, \quad (I)$$

что довольно естественно. Однако в области высоких частот $\sigma_{т.т.} \approx \sigma_{т.т.+ф.т.} \approx 1,1$, т.е. возрастание тока примерно вчетверо не влияет на стандартное отклонение. В то же время по критерию χ^2 распределения мгновенных значений близки к гауссовым. Следовательно, мы должны признать, что флуктуации, хотя и гауссовы, не обусловлены дробовым шумом (не пуассоновские). Из таблицы видно также, что вся "негауссовость" флуктуаций лежит в области фликкер-шума.

3. При 300 В соотношение (I) нарушается: $\frac{8,58}{5,40} = 1,59$, тогда как $\sqrt{\frac{3568}{1805}} = 1,4$. Различие может показаться небольшим, но сравним его с другими соотношениями между дисперсиями, приведенными в таблице. Если в области выше седьмой гармоники (рис.2а,б) белый шум превышает фликкер-шум, то должно выполняться соотношение σ^2 (все частоты) = σ^2 (нижние частоты) + σ^2 (верхние частоты).

Тогда из таблицы:

$$(1,12)^2 + (3,5)^2 = (3,67)^2, \text{ что близко к } (3,70)^2,$$

$$(1,10)^2 + (1,52)^2 = (1,88)^2, \text{ что близко к } (1,90)^2,$$

$$(4,23)^2 + (7,44)^2 = (8,56)^2, \text{ что близко к } (8,58)^2,$$

$$(3,56)^2 + (4,0)^2 = (5,35)^2, \text{ что близко к } (5,4)^2.$$

Расхождение между ожидаемыми и измеренными значениями, как видно, $\leq 1\%$.

4. В области высоких частот при $U=300$ В

$$\sigma_{\text{ф.т.}} = \sqrt{(4,23)^2 - (3,56)^2} = 2,28,$$

что на порядок больше, чем при 9В. Напомним, что средние значения фототоков при 9 и 300 В практически равны. Опять не выполняется "пуассоновость" флуктуаций.

К приведенным фактам необходимо добавить результаты осциллографических наблюдений. Режим фотодиода устанавливается в течение нескольких часов, причем: 1) к "стационарному" режиму он монотонно выходит из области больших токов ("стационарным" мы называем режим, когда дрейф тока становится незаметным на фоне флуктуаций в течение ~ 30 минут); 2) даже в "стационарном" режиме наблюдались "всплески" тока, значительно превышающие ширину шумовой дорожки; эти "всплески" мы первоначально связывали с микрофонным эффектом, но ряд контрольных экспериментов показал, что это не так. Подозрения на нестабильность источника питания и помехи по земляным контурам также отпали - при питании от батарей наблюдаемые эффекты сохранились. Характерная длительность всплесков соответствует диапазону фликкер-шума.

Выше мы привели ряд фактов, совокупность которых не укладывается в известные нам модели флуктуаций тока фотодиода.

I. Наличие фликкер-шума при достаточно высоких частотах 0,1 Гц для трех типов малогабаритных ФЭУ-140, ФЭУ-87, ФЭУ-85 в диодном включении.

2. Спектральные плотности шума темнового тока разных ФЭУ отличаются на два порядка.
3. Возрастание флуктуаций при увеличении напряжения от 9 до 300 В при сохранении среднего значения фототока.
4. "Негауссоновский" (но гауссовый) характер флуктуаций в области высоких частот.
5. Большое время установления "стационарного" режима фотодиода. Нам представляется, что данных для выдвижения каких-либо гипотез пока недостаточно.

Выяснение физических причин этих явлений представляется важным для повышения точности фотометрических измерений, но, во-первых, требует трудоемких измерений и, во-вторых, невозможно без тесного сотрудничества между экспериментаторами, конструкторами и технологами.

Список литературы

1. Перцев А.Н. Одноэлектронные характеристики ФЭУ и их применение. - М.: Атомиздат, 1971.
2. Weissman M.B. // *Rev. Mod. Phys.* 1988. V. 60. N 2. P. 537.
3. Коган Ш.М. // УФН. 1985. Т. 145. вып. 2. С. 285.
4. Ван дер Зил А. // ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 3. С. 28.
5. Hooge F.N. et al. // *Rep. Progr. Phys.* 1981. V. 44. P. 31.
6. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах. - М.: Мир, 1986. - С. 148.
7. Курчанинов Л.Л. и др. - Препринт ИФВЭ 88-183. - Серпухов, 1988.
8. Zijlstra R.J.J. and Alkemade C.Jh.J. // *J. Appl. Phys.* 1956. V. 27. N 6. P. 656.
9. MacDonald D.K. // *Nature.* 1947. V. 59. P. 608.
10. Morrison R. // *Electronics.* 1949. V. 21. P. 126.
11. Schwantes R.C. et al. // *J. Appl. Phys.* 1956. V. 27. N 6. P. 573.
12. Handel P.H. // *Phys. Lett.* 1979. V. 53A. N 6. P. 438.
13. Handel P.H. // *Phys. Rev.* 1982. V. 22A. N 2. P. 745.

Рукопись поступила 13 апреля 1989 г.

Л.Л.Курчанинов и др.

Шум темнового тока и фототока в диапазоне частот
 $3 \cdot 10^{-3}$ + $3 \cdot 10^{-1}$ Гц.

Редактор В.В.Герштейн. Технический редактор Л.П.Тимкина.
Корректор Л.Ф.Васильева.

Подписано к печати 10.05.89. Т-10647. Формат 60x90/16.
Офсетная печать. Печ.л. 0,50. Уч.-изд.л. 0,61. Тираж 250.
Заказ 355. Индекс 3649. Цена 9 коп.

Институт физики высоких энергий, 142284, Серпухов
Московской обл.

9 коп.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 89-98, И Ф В Э, 1989
