ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2007–7
ОНФ

В.Н. Евдокимов

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Д.С. Денисов

ФНАЛ, Батавия, США

Изучение кратковременной нестабильности и старения фотоумножителя ФЭУ-115М

Направлено в ПТЭ

Протвино 2007

УДК 539.1.074 М-24

Аннотация

Евдокимов В.Н., Денисов Д.С. Изучение кратковременной нестабильности и старения фотоумножителя ФЭУ-115М: Препринт ИФВЭ 2007 –7. – Протвино, 2007. – 9 с., 5 рис., библиогр.: 10.

Представлены результаты изучения нестабильности коэффициента усиления ФЭУ-115М при изменениях загрузки, соответствующих величине анодного тока от 0,02 до 120 мкА. Показаны существенные отличия в характере и величине нестабильности усиления при изменениях загрузки для различных экземпляров данного типа фотоумножителя. Относительное изменение коэффициента усиления достигает для некоторых экземпляров величины 23%. Приведены также результаты изучения старения ФЭУ – поведения усиления этих ФЭУ при долговременной работе при большой загрузке. Относительное уменьшение усиления составляет 30% после накопления на аноде заряда ~600 К.

Abstract

Evdokimov V.N., Denisov D.S. Study on Short-Term Gain Instability and Aging of FEU-115M Photomultiplier Tube: IHEP Preprint 2007 –7. – Protvino, 2007. – p. 9, figs. 5, refs.: 10.

The results of FEU-115M photomultiplier gain instability studies are presented for the changes of count rate appropriate to the anode current value range from 0.02 to 120 μA. Considerable differences from tube to tube are observed in caused by count rate changes gain instability character and its size. Gain variations for some of the tested tubes reach up to 23% in the studied anode current range. Results for the long-term behavior of the gain in high rate conditions (the aging study) are also submitted. Relative gain drop 30% is observed after accumulation of the anode charge ~600 C.

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2007

Введение

Выбор ФЭУ-115М для изучения был обусловлен планами применения большого количества ФЭУ данного типа при модернизации мюонной системы установки D0 на протон-антипротонном коллайдере ФНАЛ (Батавия, США) для приведения её характеристик в соответствие с увеличением светимости примерно на порядок величины, до $2 \cdot 10^{32}$ см $^{-2}$ сек$^{-1}$ [1]. Модернизация включала в себя создание системы триггерных сцинцтилляционных счетчиков передней мюонной системы, содержащей по 3 плоскости счетчиков с каждой стороны от точки соударений, и добавление дополнительного слоя счетчиков к центральной мюонной системе. Общее число счетчиков на основе ФЭУ-115М, включая запасные счетчики, около 6000. В настоящее время изготовление, монтаж и отладка всей системы счетчиков завершены [2] и ведется её эксплуатация в составе установки D0.

ФЭУ-115М [3, 4] имеет мультищелочной (Sb-K-Na-Cs) полупрозрачный фотокатод с рабочим диаметром 25 мм со сдвинутой в зелёную область спектра спектральной чувствительностью и 12-каскадную динодную систему линейного типа из сплава Al-Mg (последний динод из сплава Cu-Be). Диаметр колбы ФЭУ 30 мм при посадочной длине 90 мм. По своим характеристикам ФЭУ-115М хорошо подходит для использования в счётчиках мюонной системы установки D0, для которых был выбран способ светосбора с применением пластин переизлучателя, сдвигающих свет со сцинтиллятора в зелёную область спектра, и, для части счетчиков, зелёных спектросдвигающих оптических волокон. Применение большого числа ФЭУ, объединённых в группы с питанием от общего источника высокого напряжения, накладывает высокие требования к стабильности коэффициента усиления. В данной работе представлены результаты изучения нестабильности усиления ФЭУ-115М при переменной загрузке (кратковременной нестабильности), а также результаты изучения старения ФЭУ – поведения усиления этих фотоэлектронных умножителей при долговременной работе при большой постоянной загрузке.

Изучение кратковременной нестабильности

Изучение кратковременного поведения усиления ФЭУ при меняющейся загрузке проводилось на стенде, содержащем светозащитный кожух, внутри которого помещался ФЭУ с делителем и светодиоды для подсветки. Крейт CAMAC с АЦП LeCroy 2249A, связанный интерфейсом с персональной ЭВМ PC-486 использовался для сбора, обработки и вывода на печать амплитудной информации с ФЭУ. Подробное описание стенда приведено в работе [5].

Для изучения нестабильности в режиме переменной загрузки был изготовлен делитель для ФЭУ-115М со средним током 1 мА (полное сопротивление около 1,6 МОм). Первые три сопротивления делителя выбраны равными 1,8, 1,5 и 1,2 R, остальные сопротивления – 1 R. Последние 4 динода запитаны от отдельных источников стабилизированного напряжения. Делитель позволял изучать усиление ФЭУ до величины среднего анодного тока (0,5-1) мА без заметного перераспределения напряжений на динодах за счёт тока ФЭУ.

Подсвет ФЭУ осуществлялся двумя светодиодами. Один из них работал непрерывно с частотой 50 Гц и служил для измерения усиления ФЭУ. С такой же частотой осуществлялись синхронизованные с измерениями амплитуды измерения пьедестала АЦП. Задержка между сигналами ворот для измерения пьедестала и амплитуд выбрана равной 700 нс. Изменение загрузки ФЭУ обеспечивалось вторым светодиодом, запускаемым с переменной частотой от 1 кГц до 1 МГц, что позволяло изменять величину анодного тока от 0,4 мкА до 400 мкА. Анодный ток ФЭУ при выключении генератора, запускающего светодиод подсветки, был равен 0,02 мкА и вызван светодиодом для измерения усиления ФЭУ. На время измерений амплитуды сигнала ФЭУ и пьедестала АЦП импульсы подсветки выключались сигналом запрета длительностью 1,5 мкс.

После нескольких проб был выбран следующий цикл измерений, обеспечивающий относительно высокую повторяемость результатов. После включения и выставления рабочего напряжения включались импульсы подсветки с частотой 1 МГц, обеспечивающие анодный ток 400 мкА. После выдержки в течение 5 минут для “тренировки” ФЭУ импульсы подсветки выключались, и в течение 10 мин ФЭУ “входил в режим” при анодном токе 0,02 мкА. После чего начинались измерения с данным экземпляром ФЭУ. Проводилось отслеживание его усиления в течение ~1 мин, после чего включались импульсы подсветки с частотой 1 кГц (анодный ток ФЭУ 0,4 мкА). После ~1 мин измерений генератор импульсов подсвета переключался на частоту 3 кГц (анодный ток 1,2 мкА), ещё через ~1 мин на частоту 10 кГц (анодныйток4мкА), и так далее. Использовались значения анодного тока 0,4; 1,2; 4,0; 12; 40 и 120 мкА.

После измерений при 120 мкА импульсы подсветки выключались на время около 4 минут для изучения характера восстановления усиления ФЭУ (оставался анодный ток 0,02 мкА, вызванный светодиодом для измерения усиления). Затем светодиод подсветки вновь включался в режим, обеспечивающий ток 120 мкА, и продолжалось отслеживание усиления в течение следующих 4 минут.

Обработка результатов измерений заключалась в усреднении амплитуды сигнала с ФЭУ и пьедестала АЦП с шагом 5 сек для каждой точки измерений, вычитании пьедестала и нормировке полученной средней амплитуды на значение, полученное в начале измерений (в первой точке). Результаты измерений представлены в виде значений коэффициента усиления ФЭУ с интервалом 5 сек. Был изучен 21 экземпляр ФЭУ-115М при времени измерений с одним экземпляром ФЭУ около 30 минут.

Результаты измерений, приведенные на рис. 1 и 2, показывают, что имеются существенные различия в характере и величине нестабильности для различных экземпляров данного типа фотоумножителя. В первую очередь, можно различить два характерных типа поведения ФЭУ, каждый из которых представлен на рис. 1 данными для двух экземпляров со схожей зависимостью усиления от загрузки.

Первый тип, более простой и предсказуемый, изменяет усиление скачками при скачкообразных изменениях загрузки (время установления уровня усиления около 1 сек после изменения загрузки), и далее коэффициент усиления не изменяется за время 1 мин и более, до момента следующего изменения загрузки. График зависимости усиления от загрузки для таких ФЭУ (№ 3 и № 17) выглядит в виде правильных “ступенек”, изменения усиления нарастают и накапливаются по мере увеличения загрузки. Характерной чертой такого типа зависимости усиления от загрузки является насыщение изменений усиления. Усиление изменяется значительно при первых шагах изменения загрузки, а в дальнейшем меняется слабее: изменение загрузки

от 0 до 4 мкА, т.е. на 4 мкА, вызывает такое же по масштабу изменение усиления, как и изменение загрузки от 40 до 120 мкА, т.е. на 80 мкА. Аналогичное этому насыщение изменений усиления наблюдалось ранее для ФЭУ–84-3, ФЭУ 110 и ФЭУ 49Б и позволяет, для некоторых при-менений, стабилизировать усиление таких ФЭУ постоянным или импульсным подсветом фотокатода [6].

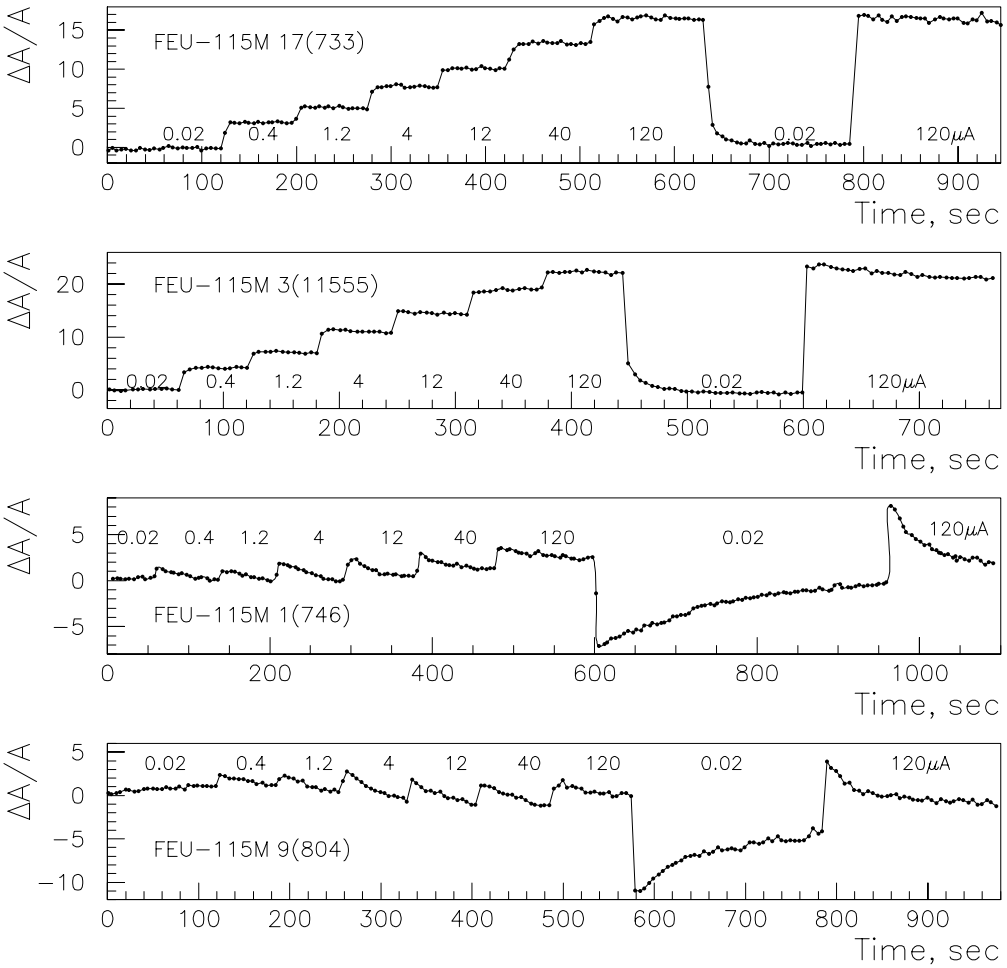

Рис. 1. Зависимость усиления различных экземпляров ФЭУ-115М от загрузки. Цифры у кривых показывают величину среднего анодного тока в микроамперах. В левой части рисунка показан присвоенный для этих измерений номер экземпляра ФЭУ и заводской номер (цифры в скобках).

Такой тип зависимости усиления от загрузки имеет хорошую повторяемость от измерения к измерению и предсказуем, так как уровень усиления при данной загрузке мало зависит от предыстории ФЭУ, то есть от режима до включения данного уровня загрузки.

Экземпляры ФЭУ № 1 и № 9 со вторым типом поведения также содержат компоненту ступенчатого возрастания усиления при увеличении загрузки, и все экземпляры похожи в отношении к такой компоненте. Но, в отличие от экземпляров с первым типом поведения, для которых такая компонента является единственной, экземпляры со вторым типом поведения ведут себя сложнее. Имеется вторая, более медленная, компонента нестабильности противоположного относительно первой компоненты знака – медленное уменьшение усиления при

увеличении загрузки. Наложение обеих компонент нестабильности для таких ФЭУ приводит к тому, что после скачкообразного увеличения усиления после изменения загрузки коэффициент усиления медленно уменьшается, в результате чего «ступени» изменения усиления не складываются и суммарное изменение усиления оказывается меньше. Характерным для экземпляров со вторым типом поведения является более сложная картина изменений усиления после выключения и последующего включения режима с анодным током 120 мкА.

На рис. 2 приведены данные измерений для экземпляров, имеющих поведение, промежуточное между первым и вторым типами, которые при некоторых из скачков изменения загрузки ведут себя как ФЭУ из первой группы, а при других – как ФЭУ из второй группы.

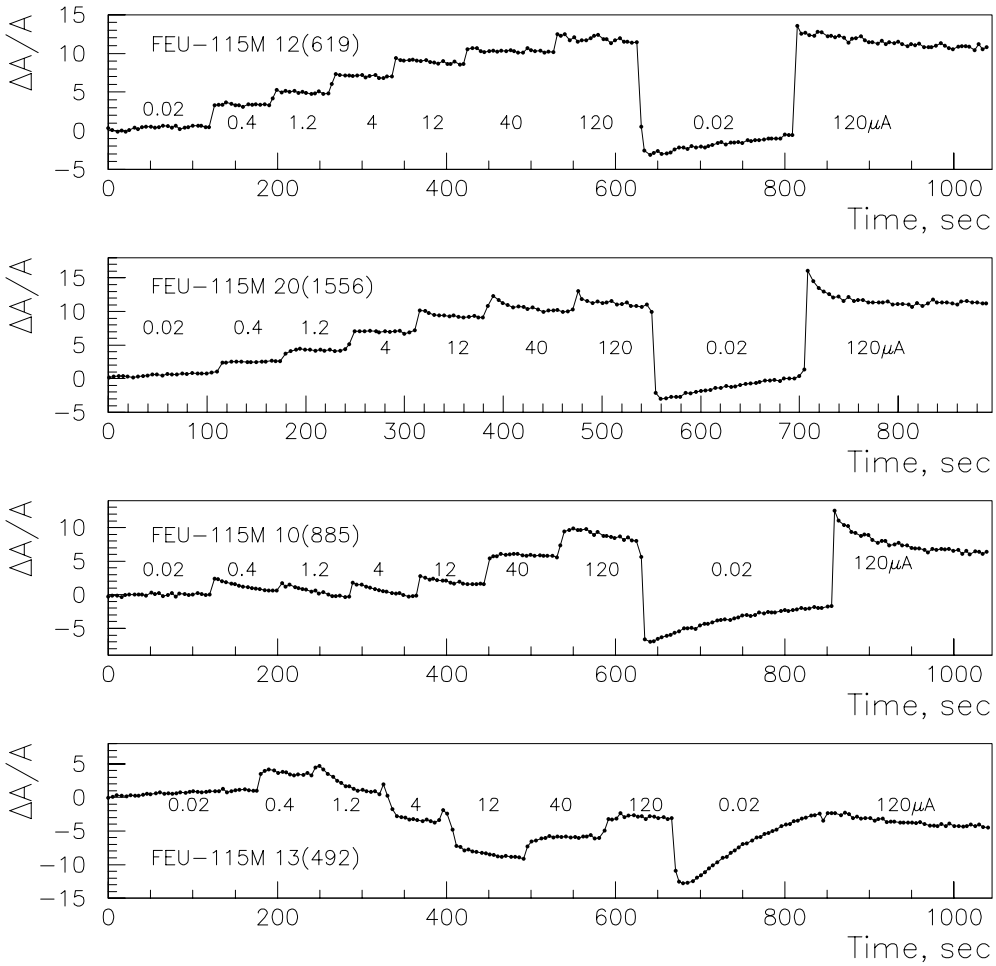

Рис. 2. Зависимость усиления от загрузки для экземпляров ФЭУ-115М с «промежуточным» типом поведения. Обозначения те же, что и на рис. 1.

При выбранном режиме измерений загрузка на каждом шаге увеличивалась приблизительно в 3 раза, что соответствует коэффициенту усиления одного динода ФЭУ. Из-за насыщения изменений усиления при увеличении загрузки каждая «ступенька» изменения усиления на рис. 1 и 2 соответствует, приблизительно, поведению определенного динода ФЭУ, так как ток предыдущих динодов ещё мал для изменений их усиления, а для последующих динодов уже наступило насыщение изменений усиления. Первая «ступенька», при изменении анодного тока

от 0 до 0,4 мкА, описывает, в основном, поведение последнего динода, вторая, от 0,4 мкА до 1,2 мкА – предпоследнего динода, и т.д. Таким образом, приведенные на рис. 2 данные показывают, что различные диноды одного и того же ФЭУ могут вести себя по-разному в отношении нестабильности усиления. В случае ФЭУ № 20 три последних динода ведут себя как первый тип, а три предыдущих показывают второй тип поведения. В случае ФЭУ № 10, наоборот, последние 4 динода соответствуют второму типу, а предыдущие 2 динода – первому типу. Привязка скачков изменения загрузки к конкретным динодам, конечно, приблизительна, но различия в поведении этих двух экземпляров очевидны. Для ФЭУ № 12 уменьшение усиления после скачкообразного его увеличения выражено слабо, особенно для первых динодов, что приближает его к экземплярам из первой группы. Экземпляр № 13 несколько выделяется от всех остальных тем, что уменьшение усиления для 2-го, 3-го и 4-го (со стороны анода) динодов значительно, хотя в целом этот экземпляр соответствует промежуточному типу, и при значениях анодного тока 40 и 120 мкА он ведет себя как первый тип. Из изученного 21 экземпляра 38% показывают нестабильность первого типа, 14% – второго и 48% относятся к промежуточному типу поведения.

Картина уменьшения коэффициента усиления экземпляра № 1 в режиме большой загрузки и восстановления усиления после выключения подсветки, в более протяженной шкале времени, представлена на рис. 3.

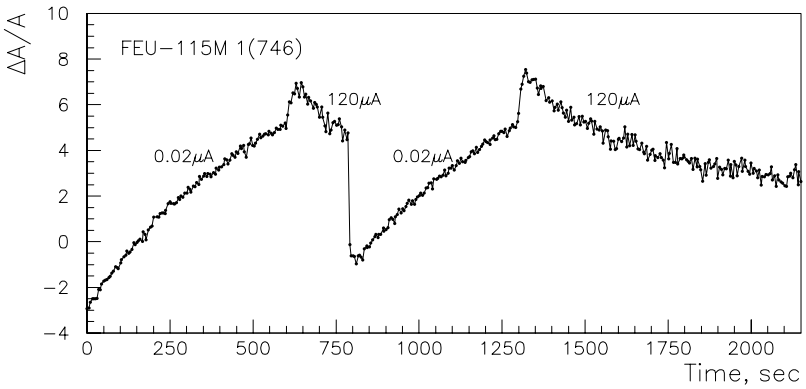

Рис. 3. Картина скорости изменения коэффициента усиления при включении и выключении режима большой загрузки (см. текст). Обозначения те же, что и на рис. 1.

Непосредственно перед измерениями был включен режим с анодным током 120 мкА, а измерения проведены при 0,02 мкА, 120 мкА, 0,02 мкА, 120 мкА последовательно. Восстановление усиления при 0,02 мкА в обоих случаях хорошо описывается экспонентой с постоянной времени равной 526 сек, а постоянная времени уменьшения усиления при 120 мкА (одной экспонентой описывается несколько хуже) равна 450 сек.

Зависимость коэффициента усиления ФЭУ-115М от величины среднего анодного тока представлена на рис. 4. Приведены значения коэффициента усиления, установившиеся через 1 мин после включения режима подсветки с данным анодным током, нормированные на величину усиления в начале измерений, для тех же экземпляров, что и на рисунках 1 и 2. Хорошо видно насыщение изменений коэффициента усиления в режиме большой загрузки: зависимость усиления от загрузки значительно слабее при больших значениях анодного тока. Бóльшая часть изменений усиления происходит при значениях анодного тока от 0 до 12 мкА. Особеннно чётко это насыщение видно для экземпляров с изменением усиления в виде правильных ступенек при ступенчатых изменениях загрузки.

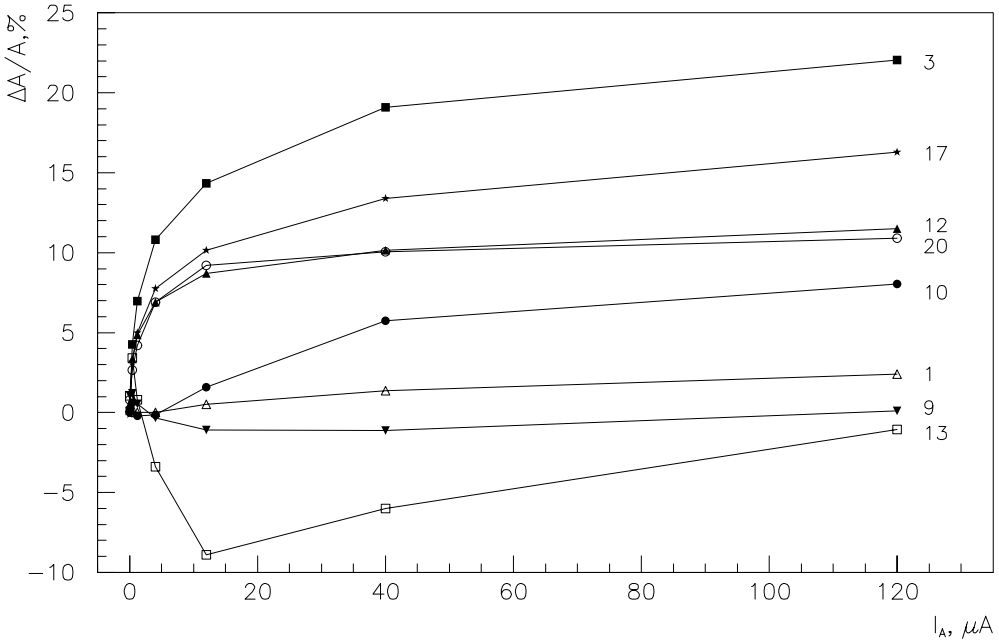

Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления ФЭУ-115М, установившегося через 1 мин после включения режима подсветки с данным анодным током, от величины среднего анодного тока. Цифры у кривых показывают присвоенный для этих измерений номер экземпляра ФЭУ.

Причины кратковременной нестабильности (зависимости усиления ФЭУ от загрузки) большинство источников отмечают как недостаточно изученные. В описаниях некоторых производителей ФЭУ в качестве основной причины кратковременной нестабильности рассматривается электростатическое влияние заряда, накапливающегося на поддержках динодов в стеклянной колбе [7]. В работе [8] приведены результаты изучения усиления фотоумножителя Philips XP-3462P в зависимости от среднего анодного тока и интенсивности светового импульса при различных распределениях междинодных напряжений, а также подробный список литературы по кратковременной нестабильности ФЭУ. В этой работе и в некоторых из приведенных в ней ссылок в качестве причины кратковременной нестабильности рассматривается изменение коэффициента вторичной эмиссии за счет процессов, происходящих при большой загрузке в поверхностных слоях динодов.

Известно, что для ФЭУ со сплавными динодами эмиттером вторичных электронов является тонкая пленка окислов BeO, MgO на поверхности динодов. В работе [6] для случая ФЭУ-84-3, ФЭУ-49Б и ФЭУ-110 накопление заряда на поверхности динодов, облегчающее выход вторичных электронов, обсуждается как играющее главную роль в нестабильности усиления таких фотоумножителей. Характер нестабильности для большинства экземпляров этих типов ФЭУ соответствует обсуждаемому в данной работе первому типу поведения для ФЭУ-115М, хотя величина нестабильности для ФЭУ-115М, в среднем, приблизительно в 1,5 раза меньше. Другие типы ФЭУ, такие как ФЭУ115 или XP1020, имеют такой же или меньший уровень нестабильности [9]. Для ФЭУ с сурьмяно-цезиевыми динодами, например для ФЭУ-85, главной причиной нестабильности принято считать испарение и диффузию цезия [10], что приводит к медленному уменьшению усиления после увеличения загрузки. Можно предположить, что в случае ФЭУ-115М, в определенной мере, играют роль оба механизма нестабильности. Хотя ФЭУ-115М относится к фотоумножителям со сплавными динодами, при нанесении мультищелочного фотокатода часть материала может осаждаться на поверхности динодов. Различная

степень такого «загрязнения» от экземпляра к экземпляру и для различных динодов может объяснить большое различие в характере и величине нестабильности различных экземпляров ФЭУ-115М.

Изучение старения ФЭУ

Изучение поведения усиления ФЭУ-115М при долговременной работе при большой загрузке проводилось с учётом условий их применения в мюонной системе установки D0. Проведенные оценки показали, что при работе с порогом электроники 10 мВ и средней величине сигнала от минимально ионизирующей частицы 30 мВ накопленный за время работы установки заряд на аноде ФЭУ достигнет 100 К для наиболее загруженных счетчиков. Для необходимого «запаса прочности» требовалось изучить поведение коэффициента усиления ФЭУ до накопленного заряда ~500 К. Чтобы набрать такой заряд за приемлемое время, анодный ток ФЭУ должен быть на уровне сотен микроампер. Использовался делитель со средним током 1 мА (полное сопротивление около 1,6 МОм), такой же, как делитель для изучения кратковременной нестабильности (для трех из пяти изученных на старение экземпляров). Для экземпляров № 4 и № 5 использовался делитель, отличающийся тем, что последние 3 сопротивления были выбраны равными 1,1 R, 1,2 R, 1,2 R. Для устранения возможного перераспределения напряжения на динодах последние 4 динода были подключены к отдельным источникам стабилизированного напряжения, что позволяло изучать усиление ФЭУ до величины среднего анодного тока (0,5-1) мА без заметного изменения напряжений на динодах за счёт тока ФЭУ. Подсветка ФЭУ осуществлялась двумя светодиодами. Кроме основного светодиода, обеспечивающего требуемый анодный ток и включенного в прямом направлении, второй светодиод, включенный в обратном направлении с частотой 100 Гц, служил для контроля стабильности основного светодиода. Бóльшая стабильность световой вспышки при включении светодиода в обратном направлении связана с меньшей зависимостью интенсивности светового импульса от амплитуды импульса генератора (~80 В). Измерения с различными экземплярами ФЭУ проводились последовательно, при этом одновременно изучались один или два экземпляра.

Результаты измерений, представленные на рис. 5a в виде зависимости амплитуды сигнала с ФЭУ от времени измерения, показывают большие различия в характере и величине нестабильности усиления для разных экземпляров. У некоторых ФЭУ (№ 2 и № 4) усиление сначала возрастает (на 25% для экземпляра № 4) и только через несколько суток начинает уменьшаться. Для других экземпляров (№ 1 и № 5) усиление в течение первых суток уменьшается от времени быстрее, чем в последующий период.

На рис. 5b те же данные измерений представлены в зависимости от величины накопленного заряда на аноде ФЭУ, причём нормировка амплитуд сигналов сделана в точке, соответствующей накоплению, примерно, 100 К заряда. Это позволило исключить влияние начального периода измерений, где особенно велики отличия в поведении различных экземпляров, на нормировку и сделало данные более однородными. После 200 К накопленного заряда для всех экземпляров усиление уменьшается от времени, и уменьшение коэффициента усиления до уровня 0,7 от начальной достигается после накопления заряда 600 К.

В некоторых точках измерений при помощи амплитудного анализатора контролировалось число фотоэлектронов в импульсе измерениями средней величины и ширины амплитудных распределений. Эти измерения показали, что уменьшается усиление ФЭУ, а не число фотоэлектронов, т.е. квантовая эффективность фотокатода не изменяется.

Проводилось также отслеживание долговременного поведения усиления ФЭУ-115М в ходе сборки плоскостей сцинтилляционных счётчиков передней мюонной системы установки D0. Части собранных плоскостей со счётчиками, содержащие 140 счетчиков, были оставлены в зоне испытаний в течение двух месяцев под напряжением в режиме анодного тока около 1 мкА,

поддерживаемого системой мониторирования на основе светодиодов. Отслеживание усиления ФЭУ производилось еженедельными измерениями импульсов от светодиодов и от радиоактивного источника Sr^{90}. Эти измерения показали, что основные изменения усиления (до 20%) происходят в течение первых 3-5 суток, после чего для всех счетчиков изменение усиления ФЭУ не превышало 10%.

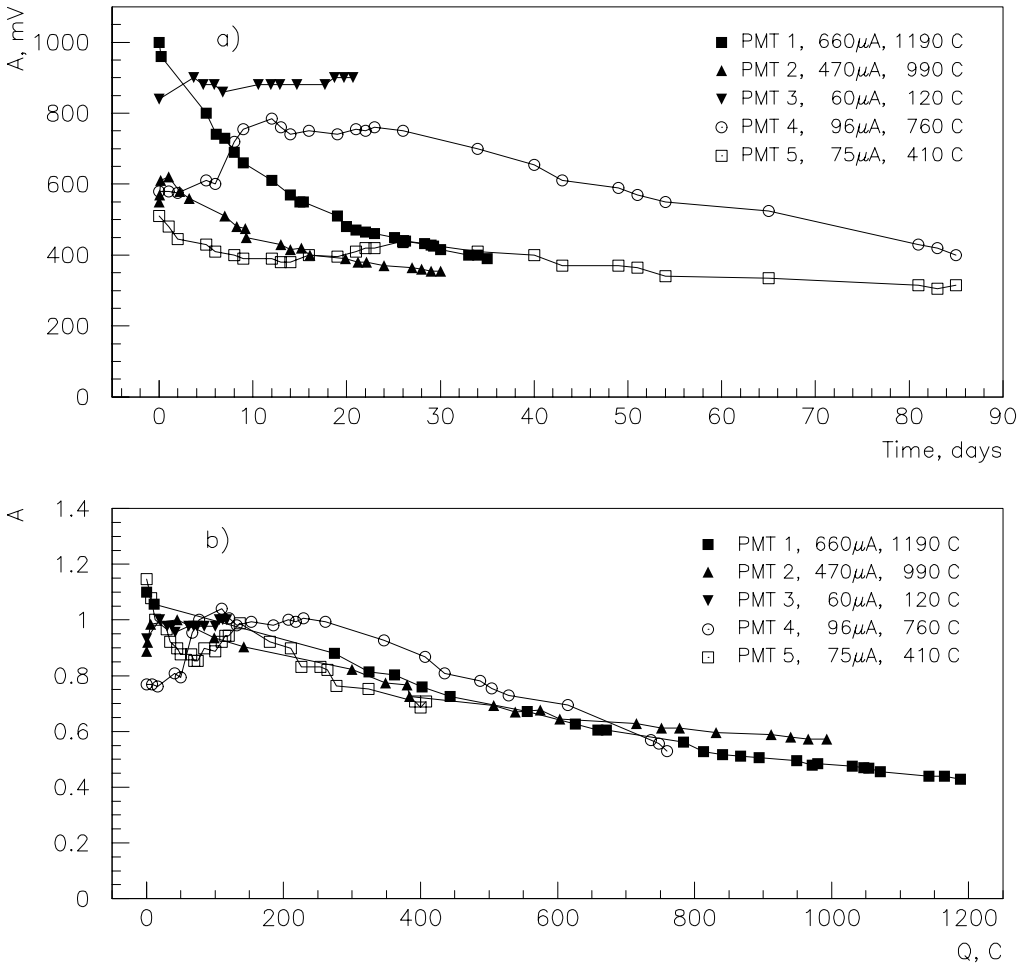

Рис. 5. Изменения усиления ФЭУ при долговременной работе при большой загрузке в зависимости от времени (a) и от величины накопленного заряда на аноде (b). Цифры показывают номер экземпляра, значение среднего анодного тока в начале измерений и накопленный к концу измерений заряд на аноде ФЭУ.

Из представленных результатов измерений следует, что долговременные изменения в величине сигналов со сцинтилляционных счетчиков мюонной системы установки D0 за счёт старения ФЭУ-115М в условиях их эксплуатации не превысят 20%. Такие изменения отслеживаются имеющейся системой мониторирования, обеспечивающей подачу на каждый фотоумножитель калибровочных световых импульсов от светоизлучающих диодов, и могут быть скомпенсированы соответствующим изменением высокого напряжения на ФЭУ.

Заключение

1. Изучено поведение коэффициента усиления 21 экземпляра ФЭУ-115М при загрузках, соответствующих величине анодного тока от 0,02 до 120 мкА. Относительное изменение коэффициента усиления является сравнимым с другими ФЭУ (ФЭУ-84-3, ФЭУ 49Б, XP-3462P) и достигает для некоторых экземпляров величины 23% при значительном разбросе от экземпляра к экземпляру в величине и характере нестабильности.

2. Изучение 5 экземпляров ФЭУ-115М на старение при загрузках, соответствующих величине среднего анодного тока от 60 до 660 мкА в течение времени от 1 до 3 месяцев показало, что при накоплении около 600 К заряда на аноде ФЭУ уменьшение усиления составляет 30%. Имеются большие различия в величине старения для различных экземпляров ФЭУ-115М, особенно при накоплении анодом первых 100 К заряда.

Авторы выражают благодарность С.П. Денисову за поддержку данной работы, А.Г. Денисову за любезное предоставление стенда для изучения характеристик ФЭУ при проведении измерений кратковременной нестабильности.

Список литературы

[1] V. Abramov, G. Alexeev, V. Babintsev et al. // Nucl. Instrum. and Meth. A419 (1998), p. 660.
[2] V.M. Abazov at al. // Nucl. Instrum. and Meth. A552 (2005), p. 372.
[3] Акционерное общество МЭЛЗ, ул. Электрозаводская, 23, Москва, 105023.
[4] S.A. Belyanchenko, V.V. Brekhovich, S.G. Dukor et al., Preprint IHEP 95 -12, 1995.
[5] С.В. Беликов, Ю.В. Гилицкий, Ю.У. Гутников и др. // ПТЭ № 3, 1997, с. 44.
[6] В.Н. Евдокимов, М.И. Мутафян. // ПТЭ № 4, 1986, с. 134.
[7] Photomultiplier Tubes. Hamamatsu Photonics K.K., Cat. No TPMO0002E03, 1994.
[8] T. Amatuni, G. Kazaryan, H. Mkrtchyan et al. // Nucl. Instrum . and Meth. A374 (1996), p. 39.
[9] Г.А. Акопджанов, Ф.В. Инякин, Р.С. Шувалов. Препринт ИФВЭ 78-127, 1978.
[10] В.И. Гранцев, Р.П. Дряпченко, В.И. Конфедератенко и др. // ПТЭ № 3, 1982, с. 159.

Рукопись поступила 26 марта 2007 г.

В.Н. Евдокимов, Д.С. Денисов
Изучение кратковременной нестабильности и старения фотоумножителя ФЭУ-115М.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 30.03.2007. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ. л. 1,375. Уч.- изд. л. 1,1. Тираж 80. Заказ 39. Индекс 3649.
ЛР №020498 от 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 2007-7, ИФВЭ, 2007