

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 621.383.292

**СИЛЬНОТОЧНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ С
УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ
БЫСТРО ПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ**

**© 2024 г. А. С. Долотов^{а,*}, М. Н. Долотова^а, Р. А. Каракулов^а,
П. И. Коновалов^а, Р. И. Нуртдинов^а**

*^аВсероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова
Россия, 127055, Москва, ул. Суцневская, 22*

**e-mail: gkvs@bk.ru*

Поступила в редакцию 13.09.2023 г.

После доработки 10.10.2023 г.

Принята к публикации 12.10.2023 г.

Приведены результаты исследовательских работ по совершенствованию технических характеристик сильноточных фотоэлектронных умножителей производства ФГУП “ВНИИА”, применяемых в сцинтилляционных детекторах для исследований импульсного гамма-нейтронного излучения. Описана конструкция и представлены результаты внедрения новых технологических процессов изготовления фотоэлектронных умножителей.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляционные детекторы на основе фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) широко применяются при исследованиях быстро протекающих физических процессов, сопровождающихся импульсным гамма-нейтронным излучением. Экспериментальные работы с применением сцинтилляционных детекторов в основном проводятся в области воздействия различных внешних факторов, таких как сильное электромагнитное поле и воздействие ударных волн. Поэтому с целью снижения влияния воздействующих факторов на результаты измерений и защиты фотоэлектронного умножителя от поражающих факторов во ФГУП “ВНИИА” был создан сцинтилляционный детектор с удаленной системой ФЭУ и

волоконно-оптическим светосбором на основе спектросмещающих световодов. Детектор с волоконно-оптическим светосбором имеет модульную конструкцию, в которой излучение сцинтиллятора передается на ФЭУ с помощью спектросмещающих органических волокон. Используемые в таких детекторах зеленые спектросмещающие световоды имеют спектр высвечивания с максимумом в точках 492 и 476 нм [1]. В то же время сурьмяно-цезиевый фотокатод сильноточных фотоэлектронных умножителей СНФТЗ-1 и СНФТ5-1, которые применяются в сцинтилляционных детекторах ФГУП «ВНИИА», имеет максимум спектральной чувствительности на длине волны 400 нм (рис. 1). Данное несоответствие приводит к снижению чувствительности сцинтилляционного детектора к ионизирующему излучению.

Кроме того, в ряде задач требуется обеспечить регистрацию импульсов ионизирующего излучения длительностью до 20 мкс. В таких случаях в фотоэлектронных умножителях с полупрозрачным фотокатодом при больших освещенностях и, следовательно, больших плотностях фототока, поверхность фотокатода при значительной величине его продольного сопротивления (у сурьмяно-цезиевого фотокатода от 10^5 до 10^7 Ом/квадрат) становится неэквипотенциальной. Отбор фототока с катода сопровождается прохождением электрического тока по поверхности катода, при этом на поверхности фотокатода возникает потенциальный рельеф, приводящий к искажению фокусирующего поля, что приводит к ухудшению условий собирания фототока и расфокусировке электронного пучка. При большой величине потенциального рельефа (больше 200 В) наступает запираение фотокатода, так как его края находятся под большим отрицательным потенциалом относительно центра, и вблизи катода возникает тормозящее поле, которое препятствует выходу фотоэлектронов. Осциллограмма, показанная на рис. 2, иллюстрирует запираение высокоомного фотокатода в результате возникновения потенциального рельефа на его поверхности при длительной засветке.

В данной работе приведены результаты исследований, направленных на улучшение технических характеристик сильноточных ФЭУ СНФТЗ-1 и СНФТ5-1, серийно выпускаемых ФГУП «ВНИИА», с целью получения максимума спектральной чувствительности ФЭУ на длине волны 500 нм и регистрации световых импульсов длительностью 20 мкс, что позволит увеличить информативность регистрации и повысить точность измерений ионизирующего излучения с помощью сцинтилляционных детекторов при исследованиях быстро протекающих процессов.

2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ФЭУ СНФТЗ-1 И СНФТ5-1

Фотоэлектронные умножители СНФТЗ-1 и СНФТ5-1 являются модернизированными версиями разработанных во ФГУП “ВНИИА” в 1967–1969 г. ФЭУ СНФТЗ, СНФТ5 [2] и по настоящее время используются для регистрации световых импульсных потоков и преобразования их в электрический аналог в составе сцинтилляционных детекторов. ФЭУ имеют временное разрешение не более 5 нс, предел линейности световой характеристики в импульсном режиме не менее 2.5 А (при освещении фотокатода световой вспышкой длительностью 0.5 мкс) и чувствительны в видимой области спектра (от 350 до 650 нм). Отличаются приборы коэффициентом усиления – у СНФТЗ-1 он составляет от 10^8 до 10^9 , у СНФТ5-1 от 10^5 до 10^7 .

Фотоэлектронные умножители СНФТЗ-1 и СНФТ5-1 (рис. 3) представляют собой вакуумные приборы, основными функциональными узлами которых являются вакуумная металлостеклянная оболочка, катодный узел, электронно-фокусирующая система, умножительная система и анодный блок. Отличие конструкции этих ФЭУ состоит в том, что СНФТЗ-1 имеет 12 каскадов усиления, а СНФТ5-1 – 8 каскадов.

В фотоумножителях СНФТЗ-1 и СНФТ5-1 используется торовидная умножительная система, имеющая ряд преимуществ перед известными другими [3], эмиттеры которой выполнены из сплава магниевой бронзы, обладающей высоким коэффициентом вторичной эмиссии.

Важным узлом конструкции ФЭУ является анодный блок, определяющий линейный участок световой анодной характеристики, величина которого должна быть достаточной для передачи формы световых импульсов большой амплитуды. Конструкция анодного блока ФЭУ СНФТЗ-1 и СНФТ5-1 позволяет создать в промежутке “последний эмиттер–анод” напряженность электрического поля порядка 1000 В/мм, которая необходима для рассасывания объемного заряда на этом участке при прохождении больших токов.

Система фокусирующих электродов обеспечивает оптимальный режим работы анодного блока и ФЭУ в целом и позволяет подбором индивидуального эксплуатационного режима получить параметры, соответствующие требованиям технических условий.

3. СИЛЬНОТОЧНЫЕ ФЭУ С МАКСИМУМОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 500 нм

В настоящее время известно множество основных типов эффективных фотокатодов, чувствительных в диапазоне от 200 до 900 нм. Согласно литературным данным [4–6] требование по максимуму спектральной чувствительности на длине волны 500 нм должны обеспечить многощелочной и GaAs-фотокатоды.

Несмотря на однозначное преимущество GaAs-фото катода по уровню интегральной чувствительности, применительно к технике изготовления металлостеклянных ФЭУ важно отметить следующее:

- GaAs-фото катода невозможно изготовить на подложках сложной формы – внутренняя часть катодного узла ФЭУ СНФТЗ-1 и СНФТ5-1 представляет собой сферическую поверхность, использование плоского катодного узла потребует значительной переработки фокусирующей системы ФЭУ;

- технология изготовления GaAs-фото катода требует сверхвысокого вакуума;

- GaAs-фото катода особо чувствительны к ионной бомбардировке, в результате которой время их жизни сокращается в несколько раз и может составить всего 50–100 ч. Для сравнения, современные многощелочные фото катода относительно “безболезненно” переносят ионную бомбардировку, и время жизни таких фото катода в аналогичных условиях может достигать 10000 ч.

Таким образом, использование многощелочного фото катода для создания сильноточного ФЭУ с максимумом спектральной чувствительности на длине волны 500 нм является оптимальным с точки зрения сохранения конструкции и ресурса ФЭУ.

Технология изготовления многощелочных фото катода известна давно, чрезвычайно сложна и допускает широкое варьирование последовательности и режимов обработки, при этом максимум спектральной чувствительности может лежать в диапазоне от 350 до 750 нм [7, 8] и сильно зависит от конечной толщины фотоэмиссионного материала. Известный способ технологии формирования фото катода, предложенный А. Соммером [9], предусматривает напыление сурьмы и последовательное введение внутрь прибора паров щелочных металлов цезия, калия и натрия. Разработанный во ФГУП “ВНИИА” технологический процесс формирования многощелочного фото катода ФЭУ СНФТЗ-1 и СНФТ5-1 отличается от предложенного А. Соммером и заключается в следующих основных этапах:

- дегазация ФЭУ при температуре 380 °С;

- охлаждение ФЭУ до температуры окружающей среды 25–35 °С;

- напыление пленки сурьмы на внутреннюю поверхность катодного стекла до потери его прозрачности на 75–80 %;

- обработка полученной пленки сурьмы парами натрия, калия, цезия путем нагрева ФЭУ до температуры в диапазоне от 180 до 200 °С для цезия, от 200 до 215 °С для калия и от 250 до 280 °С для натрия.

В результате реакции паров натрия с сурьмой образуется соединение Na_3Sb , паров калия со слоем Na_3Sb формируется соединение Na_2KSb , паров цезия – соединение $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$.

На завершающем этапе формирования фотокатода выполняется его сенсibilизация, повышающая световую и спектральную чувствительности.

По разработанной технологии были изготовлены макеты ФЭУ с многощелочным фотокатодом. Результаты измерений параметров ФЭУ показали следующее: среднее значение световой чувствительности фотокатода увеличилось в 3.5 раза, максимальное значение спектральной чувствительности фотокатода лежит в диапазоне от 480 до 500 нм, в классическом варианте СНФТ3-1, СНФТ5-1 максимум спектральной чувствительности лежит в диапазоне от 400 до 450 нм. Также стоит отметить, что разработанная технология позволила сохранить остальные параметры ФЭУ СНФТ3-1 и СНФТ5-1 на прежнем уровне: временное разрешение не более 5 нс, предел линейности световой характеристики в импульсном режиме не менее 2.5 А, коэффициент усиления от 10^8 до 10^9 для СНФТ3-1 и от 10^5 до 10^7 для СНФТ5-1.

Спектральные характеристики в относительных единицах сильноточных ФЭУ с многощелочным и сурьмяно-цезиевым фотокатодами представлены на рис. 4.

4. СИЛЬНОТОЧНЫЕ ФЭУ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ДО 20 МКС

Как было сказано выше, при больших освещенностях фотокатода возникает искажение распределения электрического поля вблизи него из-за возникновения градиента потенциала на фотокатоде при большом его поверхностном сопротивлении. Поэтому очевидной становится задача снижения потенциального рельефа, причем наиболее эффективным путем снижения потенциального рельефа является уменьшение эффективного сопротивления фотокатода.

Обычно это достигается путем нанесения фотоэмиссионного слоя на прозрачную проводящую подложку, причем собственное сопротивление проводящей подложки должно быть во много раз меньше сопротивления собственно фотоэмиссионного слоя. В этом случае эффективное сопротивление определяется только сопротивлением подложки. Но при этом возникает проблема выбора подходящего материала подложки, обладающего высокой электрической проводимостью и оптической прозрачностью, а также не вызывающего химического отравления фотоэмиссионного слоя, который содержит в себе такие щелочные металлы, как калий, натрий и цезий.

Используются подложки из таких нейтральных к щелочным металлам материалов, как хром, резистивные сплавы, никель. Все они имеют поверхностное сопротивление не меньше примерно 10^3 Ом/квдрат.

Для создания сильноточных ФЭУ, позволяющих регистрировать световые импульсы длительностью до 20 мкс, была применена запатентованная ФГУП «ВНИИА» технология с нанесением на катодный узел прозрачного проводящего покрытия оксида индия, легированного

оловом (так называемая ITO-пленка), и защитного покрытия [10]. Пленки ITO широко используются в промышленности, так как из наиболее известных и относительно доступных покрытий они обладают наилучшим сочетанием оптических и электрических свойств: прозрачность от 80 до 95 % при сопротивлении около 100 Ом/квadrat. Тонкую прозрачную защитную диэлектрическую пленку помещают между проводящим и фотоэмиссионным слоями. Данная пленка химически нейтральна к фотокатоду. При этом электрический контакт между фотоэмиссионным и проводящим слоями находится за пределами рабочего поля фотокатода.

Искажения формы импульса при различных величинах амплитуды анодного тока ФЭУ с фотокатодами без подложки и на проводящей подложке исследовались путем подачи на фотокатод светового импульса прямоугольной формы длительностью 20 мкс и регистрации импульса анодного тока ФЭУ при помощи осциллографа.

При этом численная оценка уровня искажения формы импульса вычислялась через коэффициент искажения, определяемый как

$$\delta = \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где U_1 – амплитудное значение в максимуме осциллограммы, U_2 – амплитудное значение в минимуме осциллограммы.

Коэффициент искажения формы импульса анодного тока должен быть не более 30 % во всем диапазоне линейности световой характеристики ФЭУ, т.е. при снимаемых токах более 2.5 А.

На рис. 5 показаны осциллограммы выходного импульса ФЭУ СНФТ5-1 с фотокатодом без проводящей подложки при амплитудах анодного тока от 0.1 до 2.9 А. При выходном токе 1.5 А коэффициент искажения формы импульса равен 29 %, а при токе 2.9 А – 57 %, что наглядно демонстрирует описанное выше ограничение по длительности регистрируемого импульса у стандартных ФЭУ СНФТ3-1 и СНФТ5-1.

На рис. 6 показаны осциллограммы выходного импульса ФЭУ СНФТ5-1 с фотокатодом на проводящей подложке при амплитудах анодного тока от 0.1 до 3.1 А. В этом случае при выходном токе 1.1 А коэффициент искажения формы импульса равен 15 %, а при токе 3.1 А – 20 %.

Таким образом, применение разработанного во ФГУП “ВНИИА” фотокатода конденсаторного типа в фотоэлектронных умножителях СНФТ3-1 и СНФТ5-1 позволяет получить выходной импульс длительностью 20 мкс с амплитудой до 3.1 А с искажением не более 20 %, в то время как у ФЭУ стандартной конструкции искажения формы импульса имеют значительную величину, начиная с выходных токов 1.5 А.

5. ВЫВОДЫ

Формирование многощелочного фотокатода на внутренней поверхности катодных узлов ФЭУ СНФТ3-1, СНФТ5-1 позволило изготовить приборы, имеющие максимум спектральной чувствительности на длине волны от 480 до 500 нм.

Нанесение на внутренние поверхности катодных стекол ФЭУ СНФТ3-1, СНФТ5-1 проводящих полупрозрачных подложек позволило изготовить приборы, обеспечивающие регистрацию световых импульсов длительностью 20 мкс во всем диапазоне линейности световой характеристики ФЭУ

Таким образом, в результате применения новых технологических процессов, были значительно улучшены технические характеристики серийно выпускаемых ФГУП “ВНИИА” сильноточных ФЭУ СНФТ3-1 и СНФТ5-1 для повышения точности измерений ионизирующего излучения с помощью сцинтилляционных детекторов при исследованиях быстро протекающих процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Игнатъев Н.Г., Орлов И.Е., Эргашев Д.Э.* // ПТЭ. 2016. Т. 6. С. 14.
<https://doi.org/10.7868/S0032816216060173>.
2. <http://www.vniia.ru/production/electrovacuumnie-pribory/dlya-detektorov-i-registratorov/dlya-detektorov-i-registratorov.php>
3. *Соболева Н.А., Берковский А.Г., Чечик Н.О., Елисеев Р.Е.* Фотоэлектронные приборы. Москва: Наука, 1965.
4. *Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н.* Вакуумные фотоэлектронные приборы. Москва: Радио и связь, 1988.
5. *Соболева Н.А., Меламид А.Е.* Фотоэлектронные приборы. Москва: Высшая школа, 1974.
6. *Грузевич Ю.К.* Опτικο-электронные приборы ночного видения. Москва: Физматлит, 2014.
7. *Dolotov A.S., Konovalov P.I., Nurtdinov R.I.* // J. Phys.: Conference Series. IOP Publishing. 2016. V. 747(1). P. 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/747/1/012058>.
8. *Долотов А.С., Коновалов П.И., Нуртдинов Р.И.* // Фотоника. 2015. Т. 5 (53). С. 82.
9. *Sommer A.H.* Photoemissive Materials. New York: Willey, 1968.
10. *Соколов А.Ю., Долотов А.С., Коновалов П.И., Прянишников И.Г., Рогатовская А.М.* Патент RU185547U1, 2018.

СПИСОК РИСУНКОВ

- Рис. 1.** Спектральная характеристика ФЭУ с сурьмяно-цезиевым фотокатодом.
- Рис. 2.** Искажение формы импульса на выходе ФЭУ при освещении фотокатода световым импульсом прямоугольной формы длительностью 20 мкс.
- Рис. 3.** Внешний вид ФЭУ СНФТ3-1, СНФТ5-1.
- Рис. 4.** Спектральная характеристика ФЭУ: 1 – с многощелочным фотокатодом, 2 – с сурьмяно-цезиевым фотокатодом.
- Рис. 5.** Осциллограммы импульса анодного тока ФЭУ с фотокатодом без проводящей подложки при освещении световыми импульсами длительностью 20 мкс: **а** – при выходном токе 0.1 А, **б** – при выходном токе 1.5 А, **в** – при выходном токе 2.9 А.
- Рис. 6.** Осциллограммы импульса анодного тока ФЭУ с фотокатодом без проводящей подложки при освещении световыми импульсами длительностью 20 мкс: **а** – при выходном токе 0.1 А, **б** – при выходном токе 1.1 А, **в** – при выходном токе 3.1 А.

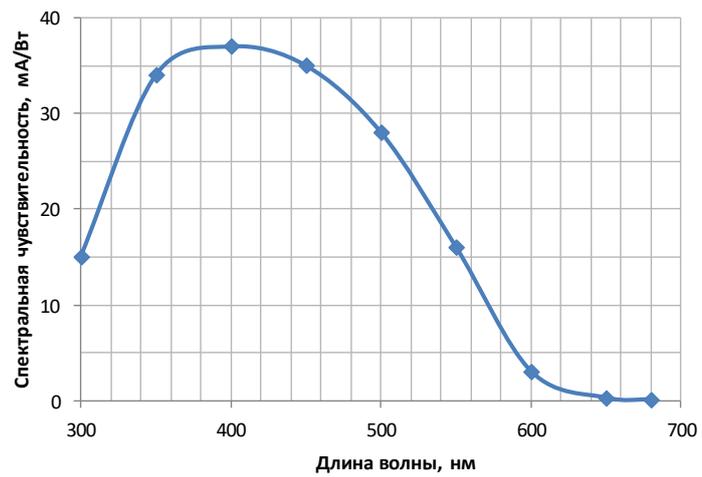


Рис. 1.

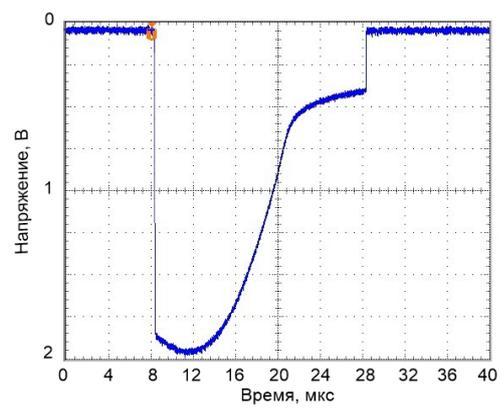


Рис. 2.



Рис. 3

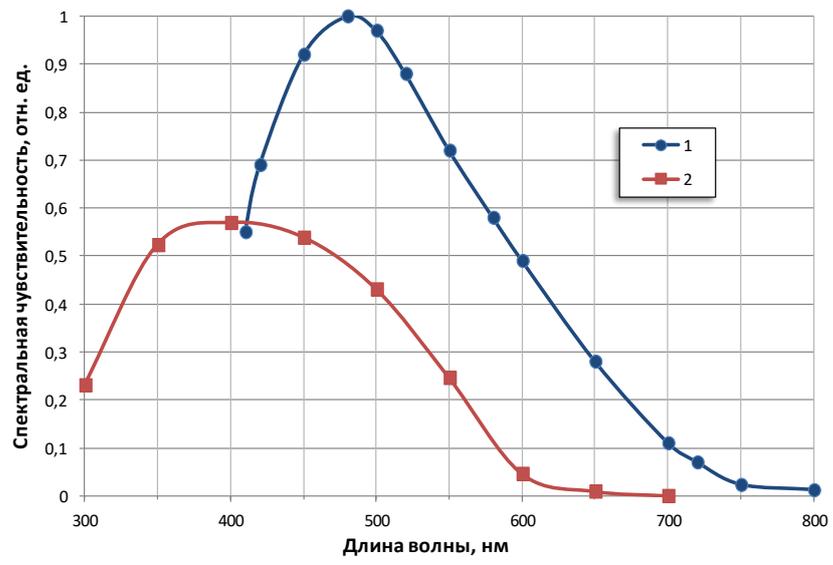


Рис. 4

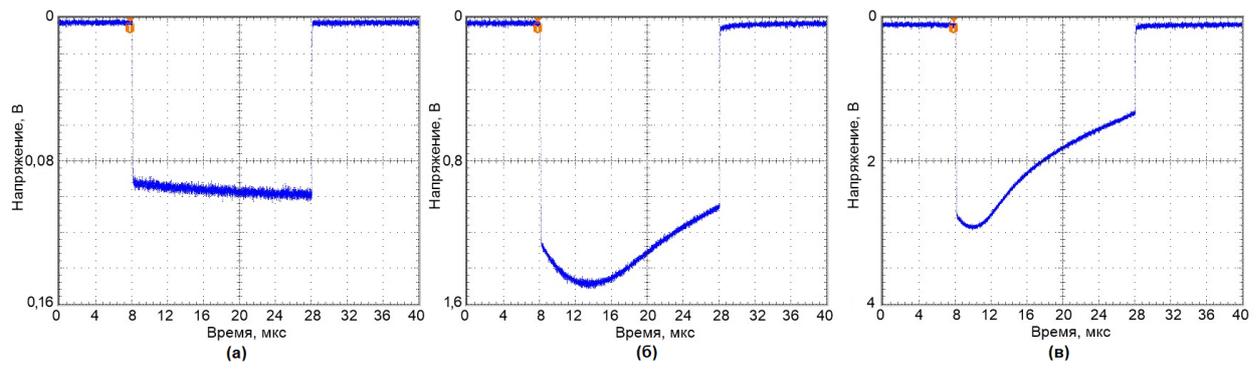


Рис. 5.

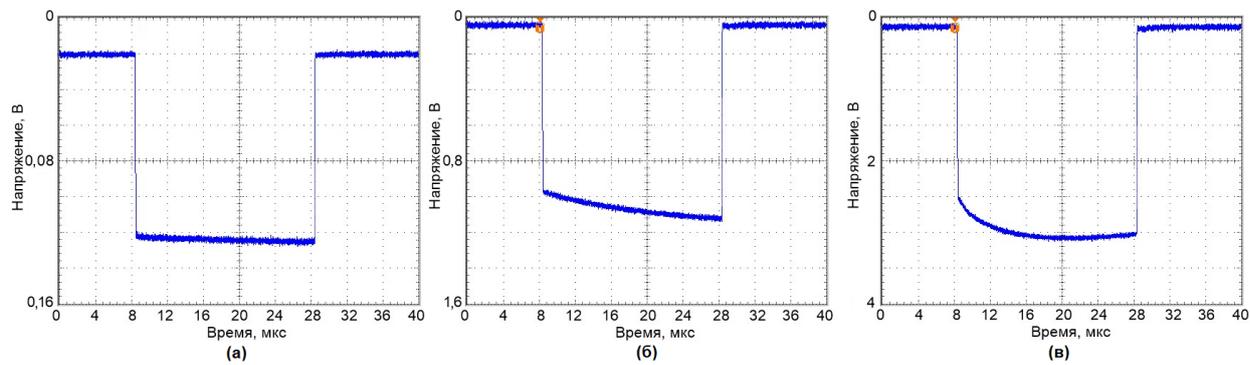


Рис. 6

Для связи с автором:

Долотов Александр Сергеевич

E-mail: gkvs@bk.ru

Для переводчика:

HIGH-CURRENT P.M.T. WITH IMPROVED PERFORMANCE FOR REGISTRATION OF FAST-FLOWING PROCESSES

Аннотация:

The results of research works on improvement of technical characteristics of high-current photoelectron multiplier tubes manufactured by FSUE VNIIA used in scintillation detectors for studies of pulsed gamma-neutron radiation are given. The design is described and the results of introduction of new technological processes of photomultiplier manufacturing are presented.