

РОССИЙСКИЕ ТЕРМОСТОЙКИЕ ФОТОУМНОЖИТЕЛИ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

С.Белянченко, Г.Изотова, С.Якушов,
ООО "МЭЛЗ ФЭУ"

В последние годы потребителей фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) интересует работоспособность термостойких ФЭУ в большом интервале температур: от 80 до 200°C. В настоящее время компания ООО "МЭЛЗ ФЭУ", известный производитель и разработчик этих приборов, приступила к изготовлению спектрометрических ФЭУ. Разработанные приборы работают в условиях повышенной температуры окружающей среды.

Многие годы наше предприятие производит приборы ФЭУ-74А и ФЭУ-102. Они просты в изготовлении, имеют высокий процент выхода на всех основных технологических операциях производства и зарекомендовали себя достаточно хорошо при эксплуатации в условиях комнатной и повышенной температур окружающей среды. Однако в последние годы потребители стали предъявлять дополнительные требования к фотоумножителям при эксплуатации в условиях повышенной температуры окружающей среды. Много вопросов возникало у потребителей по поводу термостойких характеристик ФЭУ-102. Были выдвинуты требования к исследованию плато счетной характеристики при комнатной температуре и особенно при температуре 150°C.

По согласованию с потребителями был изготовлен модифицированный ФЭУ-102М, конструктивно соответствующий ФЭУ-102. Были исследованы его рабочие характеристики: плато счетной характеристики при комнатной и повышенной до 150°C температуре. При этом был определен параметр-критерий для исследуемого плато: длина плато счетной характеристики не менее 100 В, наклон плато составляет 5% на 100 В при температуре 150°C.

Для получения требуемых параметров была разработана новая технология изготовления ФЭУ-102М. Проведены эксперименты по предварительной подготовке деталей и узлов ФЭУ. Была введена новая важная операция, она потребовала использовать новое высоковакуумное оборудование. Это операция обезгаживания колб и ножек в вакууме непосредственно перед подачей их на монтаж. На этапе откачки и активировки было введено длительное обезгаживание монтажа ФЭУ перед формированием фотокаатода и активировкой диодной системы.

В добавок к этому в технологию отдельных заготовительных операций были внесены изменения, введен строгий контроль за соблюдением технологии химической обработки, отжига деталей и узлов ФЭУ на предприятиях-смежниках. В результате принятых мер удалось улучшить характеристики выпускаемых ФЭУ-102М, предназначенных для работы при повышенной до 150°C температуре. В настоящее время только 11% образцов ФЭУ-102М имеют длину плато счетной характеристики менее 100 В, увеличен процент ФЭУ-102М, у которых плато счетной характеристики составляет 150 В и более, причем

среднее значение на большой партии ФЭУ-102М составляет порядка 160 В.

Произошло заметное увеличение ресурса ФЭУ-102М. Если ранее по результатам одночасового пребывания в среде с температурой 150°C световая чувствительность ФЭУ-102М (ΔS_k) уменьшалась в среднем на 21%, то после предпринятых технологических мер ΔS_k составляет 14% (выборка 68 штук ФЭУ).

В настоящее время намечены и другие пути усовершенствования ФЭУ-102М. Предполагается заменить крепежно-изолирующие слюдяные пластины керамическими. Партия керамики получена, и производится разработка технологии предварительной обработки керамических пластин до сборки пакетов. Керамика, безусловно, является более технологичной для использования при производстве ФЭУ, так как не подвержена расслаиванию, осыпанию, не активна при контакте со щелочными металлами. Это ведет к исключению возникновения очагов автоэлектронной эмиссии при повышенной температуре окружающей среды. Предполагается изготовление опытной партии ФЭУ-102М с керамикой, проведение всех испытаний, по результатам которых будут приняты решения.

В 2011 году больше внимания в компании стали уделять улучшению качества ФЭУ-74А. К его изготовлению применили различные методы подготовки поверхностей деталей и узлов ФЭУ: вакуумное обезгаживание колб и ножек, длительное обезгаживание слюдяных пластин и металлических деталей ФЭУ.

Прошли исследования экспериментальных образцов ФЭУ-74А, изготовленных на предварительно произведенных деталях. Были измерены параметры при температуре 150°C и нестабильность при той же температуре. Результаты оказались положительными (табл.1), вследствие этого увеличился спрос на ФЭУ-74А.

За последние два года на нашем предприятии было восстановлено производство ФЭУ-158, термостойкого к работе при температурах до 200°C. Этот фотоумножитель пользуется спросом у потребителей, причем эксплуатируется не только при температуре 200°C, но и при более низких температурах – 150 и 180°C. Это обеспечивает значительное увеличение

срока службы. По сравнению с серийно выпускаемым ФЭУ-74а, аналог нового прибора, ФЭУ-158 проявляет значительные преимущества как при комнатной, так и при повышенной температуре. Увеличение долговечности ФЭУ-158 при температурах 150, 180 и 200°C является основным направлением усовершенствования данного типа ФЭУ. За годы работы были проведены исследования по снижению газоотделения из элементов арматуры при повышенной температуре.

Для этого на все стеклянные поверхности внутри прибора различными способами наносили барьерно-диффузные пленки. Были изготовлены контрольные партии таких ФЭУ-158, проведены испытания на долговечность при повышенных температурах 180 и 200°C. На большой партии образцов наработка ФЭУ при 180°C составила 120 часов и при 200°C – 50 часов. Результаты исследований позволяют надеяться на дальнейшее увеличение долговечности при повышенных температурах.

В конце 2010 года по требованию большого числа потребителей была разработана модификация ФЭУ-158-14. Это ФЭУ-158, изготовленный на 14-вводной ножке от ФЭУ-74А, и способный служить заменой ФЭУ-74А, так как делители ФЭУ-158-14 и ФЭУ-74А абсолютно одинаковы. В течение 1-го квартала 2011 года была изготовлена опытная партия образцов ФЭУ-158-14 в количестве 25 штук. Все образцы были измерены на теплоустойчивость при температуре 180°C (табл.2). Для сравнения в таблице представлены средние значения параметров ФЭУ-158 из образцов, изготовленных за последние два месяца. Видно, что параметры ФЭУ-158-14 и ФЭУ-158 имеют близкие значения как при комнатной, так и при повышенной до 180°C температурах. 15 штук ФЭУ-158-14 отданы на испытания потребителям. Получены протоколы о положительных результатах испытаний ФЭУ-158-14. Продолжается изготовление ФЭУ "Усилие" мелкими

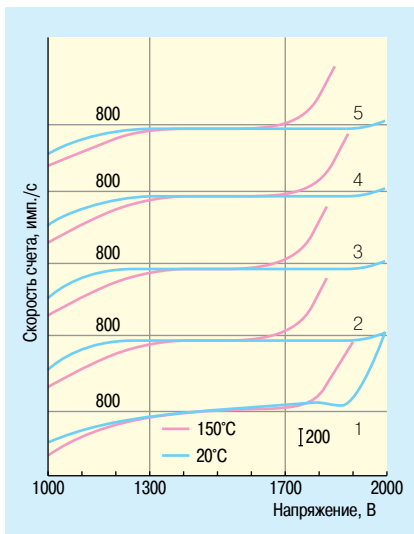


Рис.1. Счетная характеристика ФЭУ "Усилие" №160

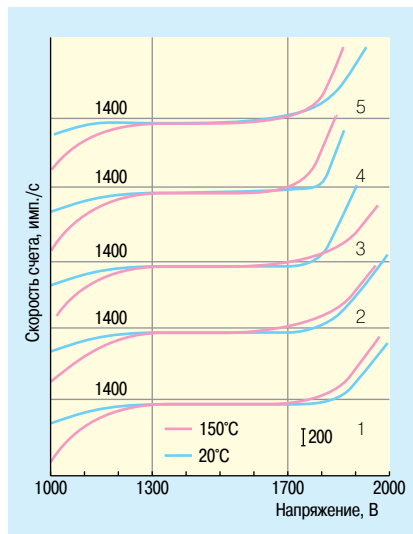


Рис.2. Счетная характеристика ФЭУ "Усилие" №165

партиями для отдельных потребителей. Одновременно производится корректировка технологии подготовки поверхностей внутренних элементов арматуры. Скорректирована также технология откачки и активировки ФЭУ "Усилие" с целью увеличения долговечности ФЭУ при температурах 150 и 180°C. Особое внимание уделяется исследованию изготовленных в настоящее время ФЭУ "Усилие".

Все 100% образцов проходят испытания на теплоустойчивость. Эта проверка содержит две операции:

1. Исследование плато счетной характеристики при температуре 150°C. Далее остывание ФЭУ до комнатной температуры и исследование его статистических параметров.
2. Исследование на теплоустойчивость при температуре 180°C: измеряются собственное амплитудное разрешение, энергетический эквивалент собственных шумов и изменение амплитуды анодного сигнала. Далее – остывание ФЭУ до комнатной температуры и измерение статических параметров.

Четыре образца ФЭУ "Усилие" были исследованы в институте "ВНИИГЕОСИСТЕМ" (г. Москва) на предмет циклических воздействий температуры 150 и 180°C. По предложенной методике испытаний были проведены исследования на циклическое

воздействие температуры 150°C (5 циклов по 6 часов) с исследованием плато счетной характеристики при комнатной температуре до нагрева и после 6 часов выдержки при температуре 150°C двух образцов ФЭУ "Усилие" № 160 и № 165. Еще два

образца ФЭУ "Усилие" № 156 и № 159 были исследованы на циклическое воздействие температуры 180°C (15 циклов по 2 часа). Измерялись собственное амплитудное разрешение, энергетический эквивалент собственных шумов на уровне 50 имп/с, изменение амплитуды анодного сигнала после двух часов прогрева при температуре 180°C.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Определение протяженности плато в счетной характеристике

Фотоумножитель, соединенный с делителем напряжения и сцинтилляционным детектором NaI(Tl), помещали в светозащищенный корпус. Затем этот блок помещался в термокамеру. Источник гамма-квантов Cs-137 активностью $5,29 \times 10^6$ Бк в свинцовом коллиматоре находился около внешней стенки термокамеры. Зависимость скорости счета от приложенного

Таблица 1. Типовые значения параметров ФЭУ-158 и ФЭУ-74А

Тип ФЭУ	ФЭУ-158			ФЭУ-74А		
	Тип.	Макс.	Мин.	Тип.	Макс.	Мин.
Спектральная чувствительность фотокатода на длине волны 410 нм, мА/Вт	46	–	32	33	–	20
Напряжение питания, соответствующее $S_a = 10$ А/лм, В	1410	1800	–	1470	1700	–
Энергетическое разрешение с Cs ¹³⁷ , $t_{комн}$, %	8,8	11	–	9,7	11	–
Рабочая температура, °С	200	–	–	150	–	–
Соответственное амплитудное разрешение при температурах, %	$t_{комн}$	5,6	–	–	6,3	6,5
	$t = 150^\circ\text{C}$	5,8	–	–	6,8	7
	$t = 180^\circ\text{C}$	7,8	–	–	–	–
	$t = 200^\circ\text{C}$	9,7	12	–	–	–
Энергетический эквивалент собственных шумов при температурах, кэВ	$t_{комн}$	1,9	3	–	2,5	3
	$t = 150^\circ\text{C}$	8	–	–	9,5	10
	$t = 180^\circ\text{C}$	18	–	–	–	–
	$t = 200^\circ\text{C}$	46	100	–	–	–
Изменение амплитуды анодного сигнала при воздействии повышенной температуры, %	$t = 150^\circ\text{C}$	±6	–	–	±46	±50
	$t = 180^\circ\text{C}$	±17	–	–	–	–
	$t = 200^\circ\text{C}$	±45	±70	–	–	–
Наработка при повышенной температуре, ч	$t = 150^\circ\text{C}$	220	–	–	50	–
	$t = 180^\circ\text{C}$	80	–	40	–	–
	$t = 200^\circ\text{C}$	16	–	8	–	–

Таблица 2. Средние значения параметров опытной партии

Температура	Параметр	Тип ФЭУ	
		ФЭУ-158-14	ФЭУ-158
Комнатная	Спектральная чувствительность фотокатода на $\lambda = 410$ нм, мА/Вт	47,5	46
	Напряжение питания, соответствующее $S_a = 10$, А/лм, В	1393	1410
	Энергетическое разрешение с Cs^{137} , %	8,8	8,8
	Энергетический эквивалент собственных шумов, кэВ	1,	2,2
180°C	Собственное амплитудное разрешение, %	7,3	7,8
	Энергетический эквивалент собственных шумов, кэВ	24	22
	Изменение амплитуды анодного сигнала при воздействии температуры, %	-7,6	-10,4

Таблица 3. Средние значения параметров ФЭУ "Усилие" (45 штук, I квартал 2011 года)

Температура	Параметр	Среднее значение параметра
Комнатная	Спектральная чувствительность фотокатода на $\lambda = 410$ нм, мА/Вт	46
	Напряжение питания, соответствующее $S_a = 10$, А/лм, В	1583
	Энергетическое разрешение с Cs^{137} , %	8,7
	Энергетический эквивалент собственных шумов, кэВ	1,9
	Длина плато счетной характеристики, В	443
150°C	Длина плато счетной характеристики, В	220
180°C	Собственное амплитудное разрешение, %	9,4
	Энергетический эквивалент собственных шумов, кэВ	24,8
	Изменение амплитуды анодного сигнала, %	-42,7

напряжения измеряли при комнатной температуре. Затем поднимали температуру до 150°C (термокамера обеспечивает точность достижения заданной температуры $\pm 2^\circ\text{C}$). После 6-часовой выдержки при этой температуре измеряли зависимость скорости счета от приложенного напряжения. Затем термокамеру отключали, и блок детектирования остужался. На этом цикл измерений заканчивался (рис.1, 2).

Собственное разрешение, энергетический эквивалент шумов, анодная чувствительность

Для измерений использовали амплитудные анализаторы SBS-79 и Nokia-4900. В качестве источника светового сигнала использовали светодиод типа BL-L513UBD с $\lambda_{\text{max}} = 470\text{нм}$ (производитель Betlux Electronics) в импульсном режиме, который располагался вне термокамеры. Светодиод соединяли с фотокатодом ФЭУ при помощи волоконно-оптического световода длиной 70 см. Предварительные испытания световода при 20 и 180°C показали, что его собственный вклад в разрешение не превышает 0,5%. Фотоумножитель, коллиматор и выходной торец световода помещали в светозащищенный кожух, который располагался в термокамере.

Предварительно на анализаторе измеряли амплитуду сигнала от фотоумножителя с детектором NaI(Tl) с подсветкой от Cs^{137} (662 кэВ) при $U_{\text{раб}} = 1500$ В. Затем, подбирая ток через светодиод, устанавливали ту же амплитуду сигнала. При комнатной

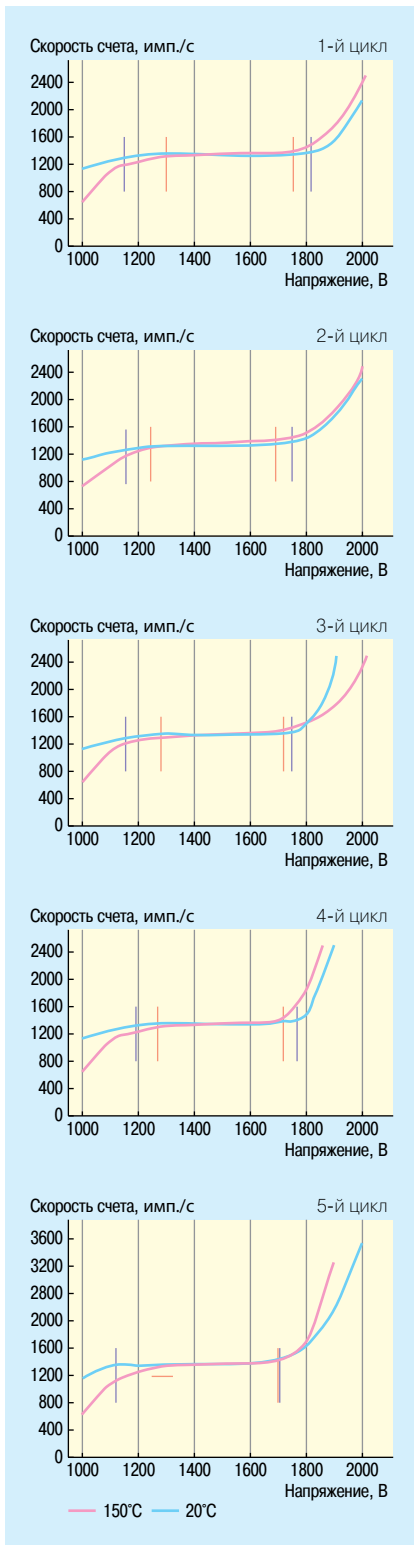


Рис.3. Результаты типовых испытаний

температуре измеряли положение пика (амплитуда сигнала), его разрешение и энергетический эквивалент шумов на уровне 50 с^{-1} при отключенном светодиоде. После этого поднимали температуру до 180°C . Выдержки при этой температуре продолжались два часа. Затем термокамеру

Таблица 4. Средние значения термостойких параметров ФЭУ-184Т

Параметр	Типовое значение параметра	
	$t = 120^\circ\text{C}$	$t = 150^\circ\text{C}$
Собственное амплитудное разрешение, %	3,7	5,6
Энергетический эквивалент собственных шумов, кэВ	9,8	26
Изменение амплитуды анодного сигнала, %	-16	-34

Таблица 5. Среднее значение термостойких параметров ФЭУ "Усмась"

Параметр	Типовое значение параметра при $t = 150^\circ\text{C}$
Собственное амплитудное разрешение, %	5,4
Энергетический эквивалент собственных шумов, кэВ	25
Изменение амплитуды анодного сигнала, %	-32

отключали и блок детектирования остужался. На этом цикл измерений заканчивался. Всего проведено пятнадцать циклов измерений с каждым фотоумножителем. Испытаниям подвергались два фотоумножителя № 156 и № 159.

Перспективные разработки

В настоящее время у потребителей возникла необходимость получить новые термостойкие ФЭУ с высокой квантовой эффективностью фотокаатода и, как следствие, с высоким энергетическим разрешением при комнатной и повышенной температуре.

Начата работа по изготовлению термостойкого крупногабаритного фотоумножителя высокого разрешения ФЭУ-184Т с диаметром колбы 52 мм. Был разработан новый сурьмяно-калиево-цезиевый фотокаатод с высокой квантовой эффективностью (среднее значение 23%), обладающий также термостойкостью до 150°C .

На нашем предприятии ФЭУ-184Т проходят 100%-ное испытание на теплоустойчивость при температуре 150°C в течение 1 часа (табл.4). Для отдельных потребителей термостойкие параметры измеряются при температуре 120°C . Продолжается разработка фотоумножителя

с высокой квантовой эффективностью (минимальное значение 18%) и термостойкостью до 150°C , но с диаметром фотокаатода 38 мм (диаметр колбы 45 мм). Был изготовлен ФЭУ "Усмась". С начала разработки и до настоящего времени потребители в основном используют ФЭУ "Усмась" как хороший спектрометрический ФЭУ. С начала 2010 года изготовлено 56 штук термостойких ФЭУ "Усмась" (табл.5).

Для развития термостойкого направления на предприятии ООО "МЭЛЗ ФЭУ" имеются все возможности. Важным направлением является поиск и применение новых материалов для крепежно-изолирующих элементов, обладающих низким газотделением при повышенных температурах. Второе важнейшее направление – покрытие стеклянных поверхностей внутренней части ФЭУ барьерно-диффузными пленками для снижения газоотделения в процессе нагревания ФЭУ. Это даст возможность изготавливать фотоэлектронные умножители, параметры которых в процессе их функционирования будут меняться незначительно, а также позволит увеличить термостойкость и долговечность ФЭУ при повышенных температурах.