

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



7955

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

13 - 7955

С.Г.Басиладзе

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ
(Обзор)

Часть 1. Временные характеристики ФЭУ.

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

С.Г.Басиладзе

**ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ
(Обзор)**

Часть 1. Временные характеристики ФЭУ.

Сцинтилляционные детекторы ^{/1-13/} обеспечивают в настоящее время наивысшую точность получения и наибольшую скорость набора временной информации при регистрации ионизирующих излучений. Достигнутые величины временного разрешения близки к 0,1 нсек, а быстродействия - к 100 МГц.

Решающий вклад в обеспечение предельных временных характеристик вносит фотоэлектронный умножитель. Коэффициент усиления фотоумножителя - K , равный средней величине отношения количества электронов, достигших анода, к количеству электронов, вылетевших с фотокатода, обычно меньше произведения величин коэффициентов вторичной эмиссии для каждого из динодов, поскольку не все выбитые электроны попадают на следующий динод. Эффект пролета может служить источником появления предимпульсов перед основным сигналом с выхода ФЭУ. Например, некоторые фотоэлектроны, пройдя мимо первого динода, могут попасть сразу на второй динод. Согласно данным работы ^{/14/}, доля пролетных электронов для фотоумножителя ФЭУ-30 составляет ~ 20% в широком диапазоне напряжений питания, причем опережение импульсов составляет ~ 6 нсек, а их амплитуда ^{/15/} может достигать до 30% от основного импульса. Наличие предимпульсов обнаружено также и в ФЭУ-36 ^{/16/}. Для временных ФЭУ, в целях снижения дисперсии электронов по скоростям, динодную систему специально конструируют таким образом, чтобы наиболее быстрые электроны не попадали на рабочий участок динода ^{/17/}.

В фотоумножителе могут появляться импульсы также и после основного сигнала. Наличие послепульсов связано с ионной и оптической обратными связями. В области выходных диодов в ФЭУ при повышенных напряжениях питания происходит сильная ионизация и возбуждение молекул остаточного газа, а также электронная бомбардировка конструктивных материалов фотоумножителя, вызывающая иногда их люминесценцию. Возникающие при этом ионы и кванты света могут попадать на фотокатод и первые диоды ФЭУ, вызывая эмиссию электронов. Задержка послепульсов оптической обратной связи равна времени пролета электронов по диодной системе и ограничена величиной ~ 50 нсек, задержка послепульсов ионной обратной связи может составлять $0,1 \div 1$ мксек^[18] и более. Доля послепульсов обычно невелика и составляет $3 \div 5\%$ ^[14,18,19].

Характеристики ФЭУ. В табл. 1 приведены основные параметры некоторых отечественных и зарубежных фотоумножителей. Фотоумножители являются генераторами импульсов тока. Форма и длительность импульсов тока при бесконечно короткой световой вспышке обусловлена рядом факторов.

Движению электрического заряда $-K \cdot N_{\text{ФЭ}}$ ($N_{\text{ФЭ}}$ - число фотоэлектронов) под действием разности потенциалов между последним диодом и анодом $-U_{\text{д-а}}$ в точке X с напряженностью поля $E(x)$ со скоростью $V(x)$ соответствует величина тока^[10]:

$$I^I(t) = \frac{K \cdot N_{\text{ФЭ}} \cdot e^2 \cdot m_e}{d^2} \cdot U_{\text{д-а}} \cdot t, \quad /1/$$

где e и m_e - заряд и масса электрона, d - расстояние между диодом и анодом. Длительность импульса тока равна времени прохождения электронов от диода до анода:

$$t_{\text{и}}^I = d \cdot \sqrt{2/m_e \cdot e \cdot U_{\text{д-а}}} \quad /2/$$

В современных временных фотоумножителях отноше-

Таблица 1
Характеристики некоторых временных фотоумножителей.

Производитель, Тип	Спектр чувствит. нм	Чувствит. фотокатода мкА/лм	Диаметр фотокатода мм	Число диодов	Разбросе напряжения, %	Кэф. усиления	$t_{\text{з}}$, нсек	$t_{\text{ф}}$, нсек	$t_{\text{и}}$, нсек	Δt , мкс	Величина сигнала - дальность действия
СССР											
ФЭУ-30	350-600	60	50	14	3,0	10^9	38	2,5	8	2	—
ФЭУ-36	300-600	40	40	13	2,5	10^8	34	2,2	6	1	—
" "	" "	" "	" "	" "	" "	" "	" "	1,3	5	11-11	750м
ФЭУ-63	350-600	30	100	14	3,0	10^9	39	3,0	11	15	—
ФЭУ-65	350-600	30	150	14	3,0	10^9	39	3,3	11	40	—
ФЭУ-87	300-600	45	20	11	2,0	$3 \cdot 10^7$		1,5	5	0,1	—
PHILIPS [20]											
56 AVP	350-600	65	42	14	2,2	10^8	45	2	7	0,5	—
56 DVP	300-500	45	42	14	2,1	10^8	43	2	7	0,2	—
XP1020	350-600	65	42	12	2,5	10^8	28	16	5	5	1000м
XP1021	350-600	65	42	12	2,5	10^8	28	16	5	5	500м
XP1023		65	42	12	2,5	10^8	28	16	5	5	500м

ние $d/\sqrt{U_{д-а}}$ настолько мало, что величина t_I^I составляет $\sim 0,3$ нсек ^{/21/} и не оказывает существенного влияния на длительность импульса тока ФЭУ.

Гораздо более существенное воздействие оказывает статистический характер размножения и движения электронов в фотоумножителе ^{/22/}. Для небольших выходных сигналов ФЭУ является линейной системой. Используя это, для исследования характеристик фотоумножителей часто применяют световспышки конечной длительности, но столь малой амплитуды, что для каждой световой вспышки происходит выбивание не более одного фотоэлектрона. Одноэлектронные импульсы имеют конечную ширину за счет временного разброса при движении электронов в диодной системе. Этот разброс обусловлен различием мест, углов вылета и начальных скоростей вторичных электронов. Одноэлектронные импульсы имеют минимальную длительность. Если в некоторой точке фотокатода произошло выбивание многих фотоэлектронов, то за счет разброса в углах вылета и в начальных скоростях они дают дополнительное расширение импульса ФЭУ. Для снижения временного разброса совершенствуют фокусирующие свойства катодного узла и диодов выбором специальной геометрии и увеличивают градиент потенциала у эмиттирующих поверхностей введением ускоряющих сеток ^{/23-27/} /рис. 1/. В табл. 2 приведены данные по временным разбросам электронов в некоторых фотоумножителях.

Существенное влияние на задержку выходного импульса оказывает место рождения фотоэлектрона на фотокатоде. Задержка минимальна при выбивании фотоэлектрона в центре и возрастает на $0,3$ нсек для ФЭУ-30 ^{/33/} и ФЭУ-36 ^{/21/} при выбивании фотоэлектрона на краю фотокатода. Для фотоумножителя ФЭУ-63 с той же, что и у ФЭУ-30, диодной системой, но с большим диаметром фотокатода, приращение задержки равно 1 нсек ^{/34,35/}, а у малогабаритного ФЭУ-87 оно составляет всего $0,05$ нсек ^{/26/}. Если фотокатод освещается не в точке, а по всей площади фотокатода, указанный эффект приводит к дополнительному расширению выходного импульса. Так, в фотоумножителе XP1020 при засветке точечного

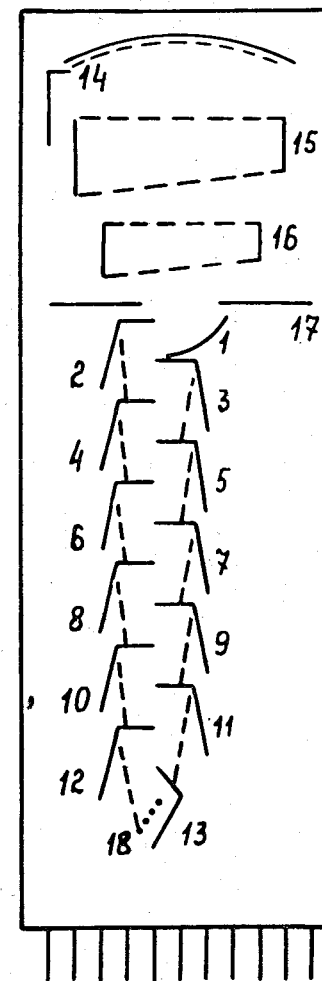


Рис. 1. Схема расположения электродов ФЭУ-36: 1 ÷ 13 - диоды с ускоряющими сетками, 14 - фотокатод, 15 ÷ 17 - фокусирующие цилиндры и диафрагма, 18 - анод.

Таблица 2
Данные по временным разбросам фотоэлектронов и вторичных электронов во временных фотоумножителях

Тип ФЭУ	Разброс фотоэлектронов		Разброс вторичн. электронов		Литература
	За счет угла вылета, нсек	За счет начальных скоростей, нсек	За счет траекторий, нсек	За счет начальных скоростей, нсек	
ФЭУ-87		0,12	0,68		[26] [27]
ФЭУ-36	0,1	1,3	0,7	0,15	[28] [21]
ФЭУ-30				0,9	[29]
56-АУР		0,5		1,0	[30]
ХР-1020		0,3		0,8	[31] [32]

участка фотокатода фронты импульсов равны 1,45 нсек, а при освещении всего фотокатода - 1,75 нсек^{21/}. Как показано в работе^{36/}, учет нелинейности в зависимости задержки от расстояния от центра фотокатода для максимальных приращений задержек - 0,35; 0,55; 1,3 нсек - дает величины среднеквадратичного отклонения для этого компонента: 0,11; 0,19; 0,45 нсек, соответственно, в случае освещения всей площади фотокатода.

Задержка сигнала с фотокатода зависит также от длины волны падающего света^{37-40/}. Существование подобного эффекта вызвано зависимостью от λ начальных скоростей фотоэлектронов. Измерения, проведенные в работе^{40/}, показали, что ФЭУ-33 и ФЭУ-36, предназначенные для временных измерений, не являются в этом отношении наилучшими. Задержка в них сокращается на 0,2 ÷ 0,4 нсек при переходе от световых сигналов с $\lambda_1 = 418$ нм к световым сигналам с $\lambda_2 = 513$ нм. При широком спектральном составе световых вспышек этот эффект даст свой вклад в расширение импульса ФЭУ.

Форма импульса тока фотоумножителя при бесконечно короткой световой вспышке, обусловленная статистическим разбросом электронов, с достаточно хорошим приближением^{41/} описывается функцией Гаусса:

$$I''(t) = \frac{K \cdot N_{\text{ФЭ}} \cdot e}{\sqrt{\pi} \cdot \sigma_{\text{ФЭУ}}} \cdot \exp \left[-\frac{t - t_3}{\sigma_{\text{ФЭУ}}} \right]^2, \quad /3/$$

где t_3 - временная задержка ФЭУ, $\sigma_{\text{ФЭУ}}$ - полная временная дисперсия фотоумножителя, равная геометрической сумме разбросов, вносимых фотокатодом и диодной системой. На практике используют и другие виды приближений^{30,42-44/}. Длительность фронтов импульсов ФЭУ, согласно /3/: $t_{\text{ф}} = 1,2 \sigma_{\text{ФЭУ}}$, а длительность импульса на уровне 0,1: $t_{\text{и}} = 3 \sigma_{\text{ФЭУ}}$.

Следующим фактором, способным внести ограничения на длительность фронтов импульсов на выходе ФЭУ, является инерционность анодного вывода, который, обладая паразитными индуктивностью и емкостью, является

цепью, интегрирующей выходной сигнал. Для ФЭУ-36, например, ^{/21/}, собственное время нарастания сигнала с анодного вывода составляет 1,8 нсек. Наличие анодного контура может привести также к паразитным высокочастотным затухающим колебаниям /или даже генерации ^{/45/} / с периодом $5 \div 8$ нсек и начальной амплитудой до 30% от величины сигнала. Для расширения полосы пропускания частот выходной системы ФЭУ применяют коаксиальный вывод с анода фотоумножителя, рассчитанный на подключение кабеля с определенным волновым сопротивлением, причем осуществляется емкостная связь цилиндра коаксиального вывода с последним динодом ^{/21,30/}. Переход в ФЭУ-36 на коаксиальный разъем позволил улучшить длительность переднего фронта с 2,2 до 1,3 нсек.

При больших входных световспышках вблизи последних динодов заряд "размножающего" импульса становится весьма значительным $/10^9 \div 10^{10}$ электронов/ и создавая собственное электрическое поле частично экранирует поле динодов. Ослабление ускоряющего поля приводит к замедлению движения пространственного сгустка электронов. Поскольку электроны в сгустке распределены неравномерно, на их малую начальную часть действие этого эффекта слабее, нежели на основную массу сгустка, что легко понять, если учесть, что время движения между соседними динодами меньше, чем временная длина сгустка. В силу этого происходит пространственная перегруппировка заряда, выражающаяся в затягивании задней части импульса тока. В работе ^{/46/} установлено, что в ФЭУ-36, при постоянном выходном сигнале, передний фронт практически не изменяется, длительность же импульса сильно возрастает при снижении напряжения питания, что показано на рис. 2. Измерения при постоянном напряжении питания также свидетельствуют об удлинении импульса при росте входных сигналов - рис. 3 ^{/47/}.

Эффект пространственного заряда вызывает нарушение пропорциональности между амплитудой импульса ФЭУ и его зарядом в силу изменения формы импульса и приводит к сдвигу назад его центра тяжести. Следовательно, для получения точной временной привязки не-

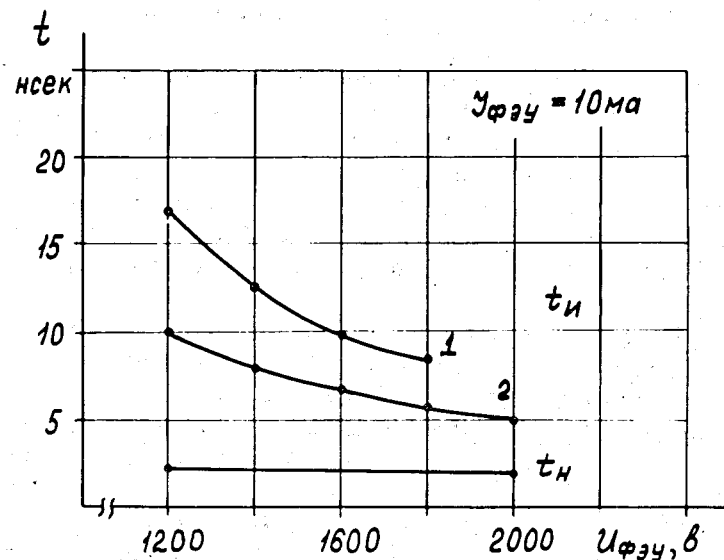


Рис. 2. Длительности фронта нарастания и всего импульса /на уровне 0,1/ для ФЭУ-36 при импульсе тока 10 мА в зависимости от напряжения питания: 1 - при равномерном распределении потенциалов на динодах, 2 - при возрастающих уровнях потенциалов на последних динодах ^{/46/}.

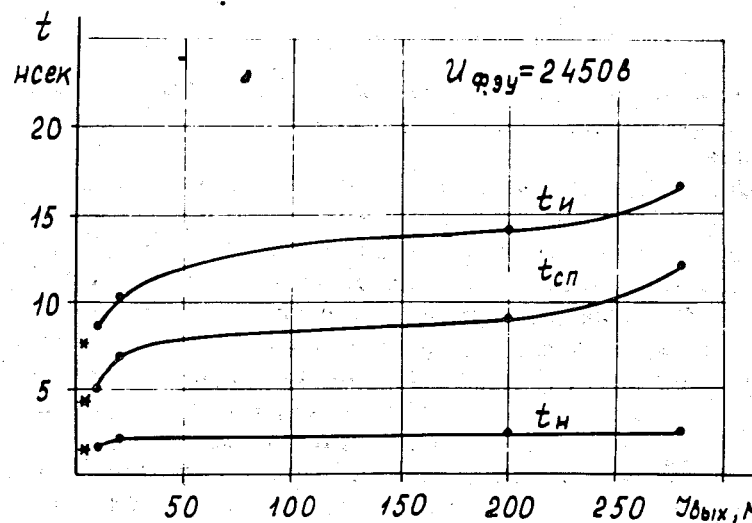


Рис. 3. Длительности фронтов нарастания, спада и всего импульса /на уровне 0,1/ фотоумножителя 56 DVP-0,3 в зависимости от амплитуды выходного тока ^{/47/}. Звездочкой отмечены величины для одноэлектронного режима.

обходимо использовать лишь передний фронт импульса ФЭУ.

Эффективным способом борьбы с затягиванием импульса является увеличение перепадов напряжения между последними диодами и анодом ФЭУ. Для этих целей применяют, в частности, импульсное питание фотоумножителей^{/48/}. Длительность фронтов импульса тока ФЭУ-30 при напряжении питания в импульсе -10 кВ -сокращается до 1,5 нсек и на порядок возрастает коэффициент усиления.

Важным временным параметром ФЭУ является задержка распространения сигнала, представляющая время движения электронов от фотокатода до анода. Задержка обратно пропорциональна корню квадратному из напряжения питания фотоумножителей. Для ФЭУ-30 и ФЭУ-36 коэффициенты пропорциональности равны, соответственно, $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ В}^{1/2} \text{ сек}$ и $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ В}^{1/2} \text{ сек}$ ^{/49/}, что согласуется также с данными работы^{/46/}. Задержка в ФЭУ значительно больше длительности импульса, поэтому требуется высокая точность поддержания напряжения питания для достижения стабильности временного положения импульса:

$$\Delta t_{\text{з}} / t_{\text{з}} = - \Delta U_{\text{фэу}} / 2U_{\text{фэу}} \quad /4/$$

Для оценки изменения задержки ФЭУ можно считать, что она сокращается на 1 нсек при повышении напряжения питания на 100 В.

Временное разрешение ФЭУ. Временное положение импульса ФЭУ имеет некоторую неопределенность, связанную со статистическим характером процесса усиления. На рис. 4а показан передний фронт импульса фотоэлектронов. Реакции диодной системы на слагающие его участки пренебрежимо короткой длительности обозначены на рис. 4б пунктирными и тройными штрих-пунктирными линиями, амплитудный разброс их обратно пропорционален амплитуде^{/30,50/}. Весьма характерным для результирующих суммарных анодных сигналов, заключенных между сплошными линиями на рис. 4б, является наличие минимума временного разброса при некоторой фиксиро-

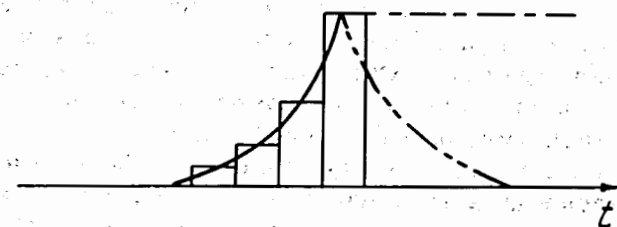


Рис. 4. Образование временной неопределенности переднего фронта импульса ФЭУ: а/ импульс фотоэлектронов, б/ реакция на него диодной системы.

ванной части амплитуды, в то время как для короткого импульса фотоэлектронов наилучшее временное разрешение получается при нулевом пороге /см. одну из пунктирных пар кривых/. Образование минимума вызвано вкладом в неопределенность сравнительно пологой начальной части импульса фотоэлектронов.

При уменьшении амплитуды световспышки амплитудная дисперсия начальной части выходного импульса будет возрастать быстрее, чем у вершины, следовательно, при общем ухудшении временного разрешения минимум его сдвигается в сторону большего относительного порога $-h$. При уменьшении длительности переднего фронта импульса фотоэлектронов /сокращении их временного разброса/ временное разрешение улучшается, а минимум его смещается в сторону меньших h . Начиная с величины отношения временной дисперсий фотоэлектронов к временной дисперсии вторичных электронов $\sigma_{\text{фэ}} / \sigma_{\text{вэ}} = 0,3/30,50/$ минимума во временном разрешении не наблюдается, т.е. наилучшее временное разрешение соответствует $h = 0$. Качественный ход этих зависимостей иллюстрируется рис. 5 для случая $\sigma_{\text{фэ}} = \sigma_{\text{вэ}}$. На величину временной неопределенности оказывает также некоторое влияние длительность заднего фронта импульса фотоэлектронов /рис. 4а/, что отражено на рис. 5а.

На рис. 6а приведены зависимости временного разрешения от величины порога, снятые экспериментально для сравнительно коротких световспышек с фотоумножителем ХР1020 /⁵¹/, а на рис. 6б приведены расчетные данные /^{50,32}/ для этого фотоумножителя, полученные методом Монте-Карло. Ход кривых подтверждает описанные выше зависимости.

При числе фотоэлектронов в импульсе, меньшем чем $20 \div 30$ /³⁰/, наблюдается дополнительный вклад в ухудшение временного разрешения ФЭУ за счет статистического разброса числа выбиваемых фотоэлектронов /⁵²⁻⁵⁶/ Отклонение от закона $\delta t_{\text{мин}} \sim 1/\sqrt{N_{\text{фэ}}}$ достигает величин $50 \div 100\%$ для $N_{\text{фэ}} = 10 \div 5$.

Загрузочные /частотные/ характеристики ФЭУ. Эксперименты, проведенные с фотоумножителями /⁵⁷⁻⁶¹/

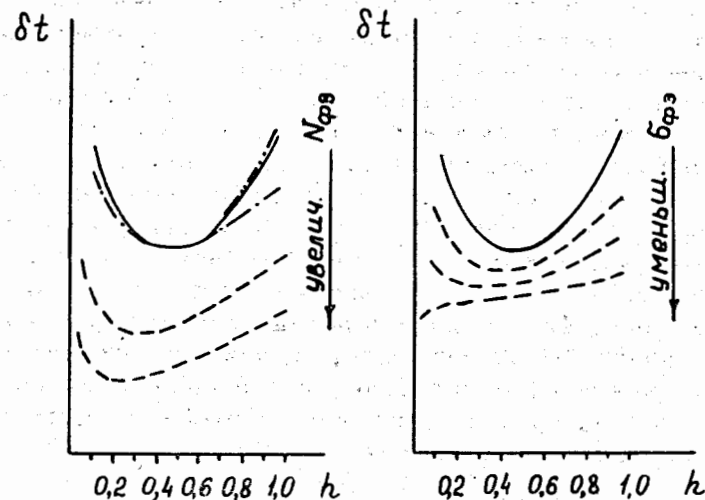


Рис. 5. Графики зависимости разрешающего времени ФЭУ от величины относительного порога дискриминации: а/ для различного числа фотоэлектронов, б/ для различных величин временной дисперсии фотоэлектронов.

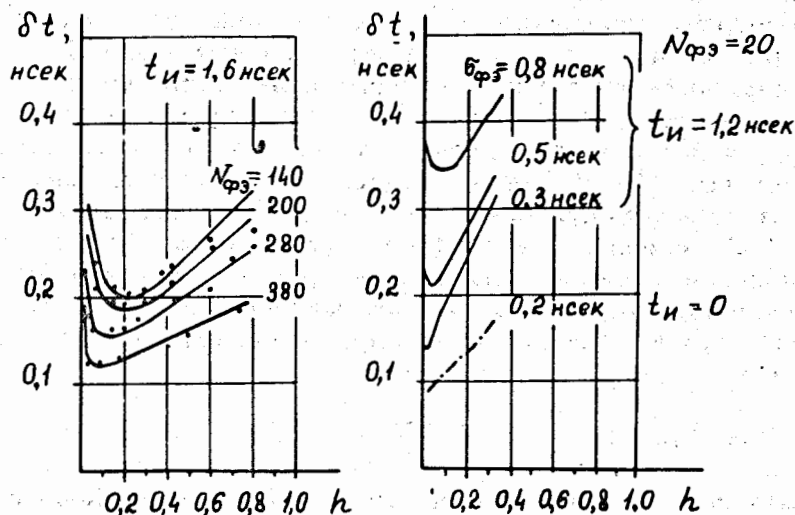


Рис. 6. Зависимости разрешающего времени фотоумножителя ХР1020 / $\sigma_{\text{вэ}} = 0,8$ нсек/ от относительного порога дискриминации: а/ при различном числе фотоэлектронов /⁵¹/, б/ для различных величин временной дисперсии фотоэлектронов / $t_{\text{и}} = 1,2$ нсек, /³²/, $t_{\text{и}} = 0$ /⁵⁰/, при $N_{\text{фэ}} = 20$.

показали, что они способны работать с большими частотами повторения импульсов без существенного изменения амплитуды выходного сигнала. При больших импульсных нагрузках постоянная составляющая тока анода и последних динодов становится значительной, поэтому для задания потенциалов последних динодов необходимо применять источники напряжения с малым внутренним сопротивлением. В работе^{/61/} получены результаты измерений временного дрейфа выходных импульсов ФЭУ при больших нагрузках /рис. 7, 8/. От источников с малым внутренним сопротивлением фиксировались потенциалы четырех последних динодов. По мнению авторов, причиной изменения задержки является сдвиг потенциалов незаблокированных динодов, поскольку при снижении напряжения питания изменение задержки сокращается.

Шумы ФЭУ. При нормальной температуре и отсутствии засветки фотокатода на аноде фотоумножителя присутствует достаточно большое число случайно распределенных импульсов. Их появление может быть вызвано различными причинами^{/62/}. Обычно наиболее существенный вклад дает термоэлектронная эмиссия с фотокатода, имеется также некоторый вклад термоэлектронной эмиссии с первого динода^{/14/}. Исследование шумовых свойств ФЭУ ведут с помощью одноэлектронной методики^{/14,62-65/}. Амплитудное распределение термоэлектронных импульсов с фотокатода соответствует закону Пуассона, а на счетной характеристике шумовых импульсов имеется "плато" по напряжению питания. Интенсивность термоэлектронных импульсов нетрудно оценить, исходя из паспортных данных по величине темнового тока I_T :

$$N_T = I_T / K \cdot e. \quad /5/$$

Временные фотоумножители имеют сравнительно большие величины темновых токов $I_T \approx 1 \text{ мкА}$, что соответствует $N_T \approx 6 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-1}$.

При повышенных напряжениях питания может происходить автоэлектронная эмиссия с острых краев электродов.

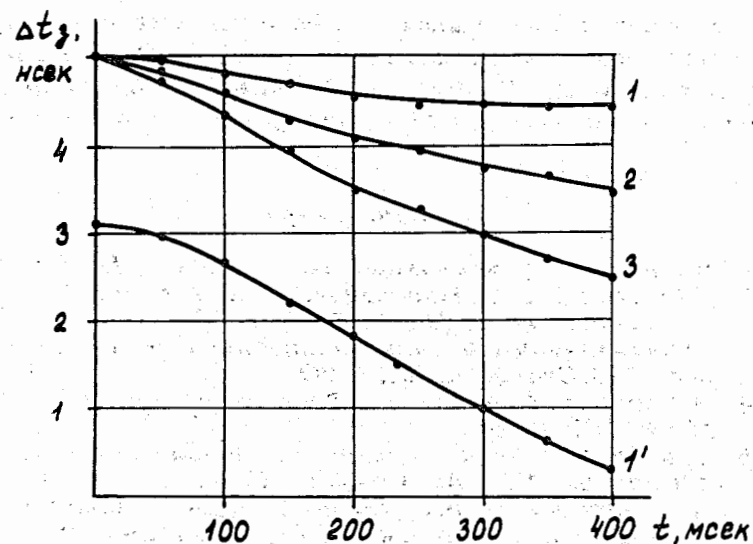


Рис. 7. Изменение задержки ФЭУ 56DVP (1÷3) и 56AVP (1') на протяжении импульса пучка ускорителя при средней интенсивности: 1 - $5 \cdot 10^6$, 2 - $1 \cdot 10^7$, 3 - $2 \cdot 10^7$ частиц/сек^{/61/}.

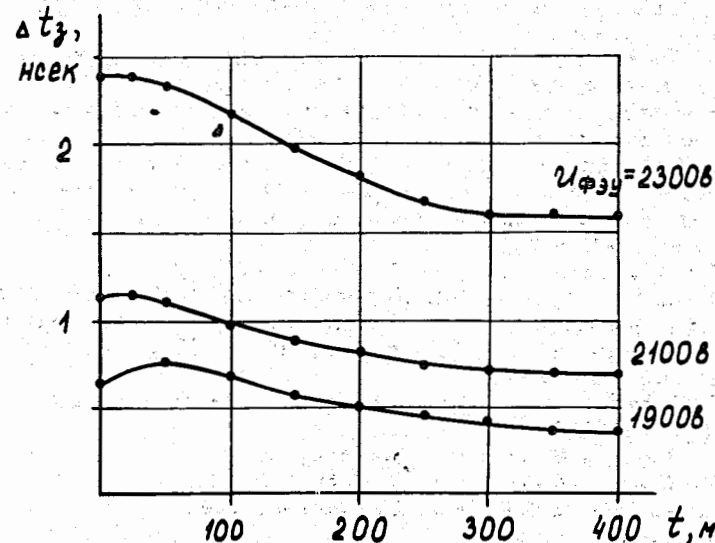


Рис. 8. Изменение задержки ФЭУ 56DVP на протяжении импульса пучка ускорителя при средней интенсивности $5 \cdot 10^6$ частиц/сек для различных напряжения питания^{/61/}.

Этот эффект слабее выражен в фотоумножителях с торондальной геометрией динодов - типа ФЭУ-30, не имеющих острых граней^{/66/}. Возможен также вклад разрядных явлений в остаточном газе, содержащемся в колбе ФЭУ.

Литература

1. Дж. Биркс. Сцинтилляционные счетчики, М., ИЛ, 1955.
2. Н.О. Чечик, С.М. Файнштейн, Г.М. Лифшиц. Электронные умножители, М., ГИТТЛ, 1957.
3. Сцинтилляторы и сцинтилляционные материалы. Под ред. В.И. Старцева, М., 1960.
4. В. Гартман, Ф. Бернгард. Фотозлектронные умножители. М.-Л., ГЭИ, 1961.
5. В.О. Вяземский и др. Сцинтилляционный метод в радиометрии. М., "Атомиздат", 1961.
6. В.В. Матвеев, А.Д. Соколов. Фотоумножители в сцинтилляционных счетчиках. М., Госатомиздат, 1962.
7. Ю.К. Акимов. Сцинтилляционные методы регистрации частиц больших энергий. Изд. МГУ, М., 1963.
8. Сцинтилляторы и сцинтилляционные материалы. Под ред. Э.Ф. Чайковского. Изд. ХГУ, Харьков, 1963.
9. Н.А. Соболева и др. Фотозлектронные приборы. М., Наука, 1965.
10. А. Снелл. Приборы для регистрации ядерных излучений и их применение, М., Атомиздат, 1965.
11. Э. Шрам, Р. Ломбер. Органические сцинтилляционные детекторы, М., Атомиздат, 1967.
12. Е.И. Рехин и др. Измерение интервалов времени в экспериментальной физике. М., Атомиздат, 1967.
13. Fast response photomultipliers. Appl. Book Philips, ed. Hull M.D., C.Eng., A.M.I.E.R.E., 1971.
14. И.Р. Гулаков и др. ПТЭ, 5, 170 /1971/.
15. Э.В. Ланько, Г.С. Домбровская. ПТЭ, 5, 182 /1967/.
16. Г.С. Домбровская, Э.В. Ланько. Прикладная ядерная спектроскопия. Сб. статей, стр. 274, Вып. 1, М., Атомиздат, 1970.
17. Л.Г. Лейтзен и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 21, 1653 /1957/.
18. К.Р. Meyer, A. Maier. Helv. Phys. Acta, 27, 57, 1957.
19. M.H. Greenblatt. IRE Trans., NS-5, No. 1, 13, 1958.
20. Philips Data Handbook, Part 6, Netherland, 1969.
21. А.Г. Берковский, С.Г. Дукор. Изв. АН СССР, сер. физ., XXIX, 2, 328 /1965/.
22. G.A. Morton et al. IRE Trans., NS-5, No. 3, 98, 1958.
23. J.S. Allen, L.R. Megill. IRE Trans., NS-3, No. 4, 39, 1956.

24. F.W. Schenkel. IRE Trans., NS-5, No. 3, 117, 1958.
25. J. Sharpe. IRE Trans., NS-7, No. 2-3, 44, 1960.
26. С.Г. Дукор, О.С. Королькова. Материалы симпозиума по наносекундной ядерной электронике, Дубна, - 1967, ОИЯИ, 13-3700, Дубна, 1968.
27. Л.Г. Лейтзен, О.С. Королькова. Электронная промышленность, 2, 58 /1973/.
28. А.Г. Берковский. Радиотехника и электроника, VIII, 4, 709 /1963/.
29. А.Г. Берковский и др. Изв. АН СССР, сер. физ., XXVI, 7, 932 /1963/.
30. L.G. Hyman et al. *RSI, 35, No. 3, 393, 1964.
31. V. Bengston, M. Moszyaski. *NIM, 81, No. 1, 109 (1970).
32. V. Bengston, M. Moczyński. NIM, 75, No. 1, 152, 1969.
33. Ю.А. Кулинич, В.Г. Рукавишников. ПТЭ, 6, 140 /1967/.
34. А.Г. Берковский и др. ПТЭ, 2, 123 /1966/.
35. Ю.А. Кулинич и др. ПТЭ, 3, 141 /1967/.
36. F. de la Barre. NIM, 102, No. 1, 77, 1972.
37. B.D. Venetta. RSI, 30, 450, 1959.
38. A. Muller et al. RSI, 36, 1214, 1965.
39. L. Gatti, O. Salma. Acta. Phys. et Chem., Szeged, 14, 3, 1968.
40. С.В. Волков, В.И. Широков. ПТЭ, 6, 168 /1970/.
41. И. Льюис, Ф. Уэлс. Миллимикросекундная импульсная техника, М., ИЛ, 1956.
42. Ю.К. Акимов и др. Быстродействующая электроника для регистрации ядерных частиц, М., Атомиздат, 1970.
43. T. Tanasescu. IRE Trans., NS-7, No. 3, 39, 1969.
44. E. Gatti, V. Svelto. NIM, 30, 213, 1964.
45. В.Я. Аверченко и др. ПТЭ, 5, 189 /1966/.
46. Т.А. Демьянова и др. ПТЭ, 4, 154 /1969/.
47. G. Blanchetti, B. Righini. NIM, 105, No. 1, 45 (1972)
48. И.В. Санин и др. ПТЭ, 1, 163 /1970/.
49. В.В. Ковалев. ПТЭ, 1, 158 /1972/.
50. В.А. Бекетов и др. Препринт ИФВЭ, СЭФ 68-50, Серпухов, 1968.
51. G. Bertolini et al. NIM, 42, 109, 1966.
52. R.F. Post, L.T. Schiff. Phys. Rev., 80, 6, 1113, 1950.
53. E. Gatti, V. Svelto. NIM, 4, 189, 1959.
54. В.В. Якушин. ПТЭ, 3, 93 /1965/.
55. Ю.К. Акимов. Препринт ОИЯИ, 13-3724, Дубна, 1968.
56. С.В. Донсков и др. ПТЭ, 1, 177 /1970/.
57. С. Cernogoi et al. NIM, 6, 193, 1960.
58. С. Cernogoi et al. Acta Electronica, 5, No. 1, 53, 1961.

* RSI - The Review of Scientific Instruments.

* NIM - Nuclear Instruments and Methods.

59. Ж.М.Ронкин. *Радиотехника и электроника*, X, 7, 1282 /1965/.
60. В.Г.Горбенко и др. *Препринт ОИЯИ*, 13-3095, Дубна, 1967.
61. М.Ю.Казаринов и др. *ПТЭ*, 1, 81 /1973/.
62. Т.А.Ковалева и др. *ПТЭ*, 5, 5 /1966/.
63. Ю.К.Акимов, К.Цигелман. *Материалы симпозиума по наносекундной ядерной электронике*, Дубна, - 1967. *ОИЯИ*, 13-3700, Дубна, 1968.
64. И.С.Гук и др. *ПТЭ*, 5, 168 /1971/.
65. M.Duquesne M., Tatischeff-Kaplan O., *Colloque Intern. d'Electronique Nucleaire. Paris, Nov. 1963.*
66. А.Г.Берковский и др. *ПТЭ*, 5, 201 /1965/.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 мая 1974 года.