

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 681.7.064.3+535.243

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ ФЭУ-175, ФЭУ-186 С ДЖИТТЕРОМ 0.4 нс

© 2023 г. Ф. А. Ермалицкий^{а,*}, К. Ф. Ермалицкая^б, В. Н. Лукьянов^с, А. Н. Вязников^с,
Р. В. Кирпиченко^с, Г. А. Мамаева^с, А. Е. Радько^а, М. П. Самцов^{а,**}, О. А. Филипова^с

^аИнститут прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ

Беларусь, 220062, Минск, ул. Курчатова, 7

^бБелорусский государственный университет

Беларусь, 220050, Минск, просп. Независимости, 4

^сЦНИИ “Электрон”

Россия, 194223, Санкт-Петербурге, просп. Тореца, 68, Литер Р

*e-mail: f.ermalitski@gmail.com

**e-mail: samtsov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2022 г.

После доработки 15.06.2022 г.

Принята к публикации 05.09.2022 г.

Представлены результаты исследований временных характеристик (счетных, распределений амплитуд одноэлектронных импульсов, разброса времени прохождения сигналов (джиттера) при воздействии излучением пикосекундных диодных лазеров в спектральном диапазоне 405–780 нм) быстродействующих фотоумножителей ФЭУ-175 и ФЭУ-186 производства АО ЦНИИ “Электрон” (Санкт-Петербург). ФЭУ-175 и ФЭУ-186 соответственно оснащены бищелочным и мультищелочным фотокатодами, их рабочий спектральный диапазон составляет 250–650 и 250–800 нм соответственно. Усиление сигналов обеспечивает 14-диодная система умножения, при этом время нарастания импульсной характеристики ФЭУ не превышает 1.5 нс, а джиттер составляет около 0.4 нс. Данные ФЭУ могут использоваться в качестве фотодетекторов в одноквантовых кинетических спектрометрах с субнаносекундным разрешением и в других быстродействующих оптоэлектронных регистраторах.

DOI: 10.31857/S0032816223010147, EDN: PVAFCP

Разрешающая способность и точность оптической спектрометрии ограничивается в настоящее время параметрами используемых фотодетекторов, что особенно характерно для одноквантовой кинетической флуориметрии [1, 2]. Так, разрешающая способность приборов времякоррелированного счета фотонов ограничена дисперсией времени прохождения сигналов Dt_j (джиттером) в умножительной системе фотоприемников. В качестве фотодетекторов одноквантовых флуориметров в большинстве случаев используются вакуумные фотоумножители [3, 4], лучшие из которых имеют джиттер 0.15–0.2 нс и заметно превосходят микроканальные, гибридные и твердотельные ФЭУ по обнаружительной способности и отношению сигнал/шум.

Нами были исследованы временные характеристики быстродействующих фотоумножителей ФЭУ-175 (№ 60, дата изготовления 11.2018 г.) и ФЭУ-186 (№ 36, дата изготовления 05.2017 г.) производства АО ЦНИИ “Электрон” (Санкт-Петербург). Данные приборы оснащены соответ-

ственно бищелочным и мультищелочным фотокатодами, их рабочий спектральный диапазон составляет 250–650 и 250–800 нм соответственно. Усиление сигналов обеспечивает 14-диодная система умножения, при этом время нарастания импульсной характеристики ФЭУ не превышает 1.5 нс.

Измерения временных характеристик были выполнены при использовании вышеуказанных фотоумножителей в качестве фотодетекторов одноквантового кинетического спектрометра ФЛУ-ОР с рабочим диапазоном от 0.1 нс до 100 мкс, его функциональная схема приведена на рис. 1.

Одноквантовый фотоприемник (ОФП), в составе которого исследовались фотоумножители ФЭУ-175, ФЭУ-186, имел цилиндрический металлический корпус и содержал устройство стыковки с монохроматором, короткофокусную собирающую линзу, фотодетекторный и электронный отсеки. В фотодетекторном отсеке расположен ФЭУ, а в электронном — перестраиваемый делитель на-

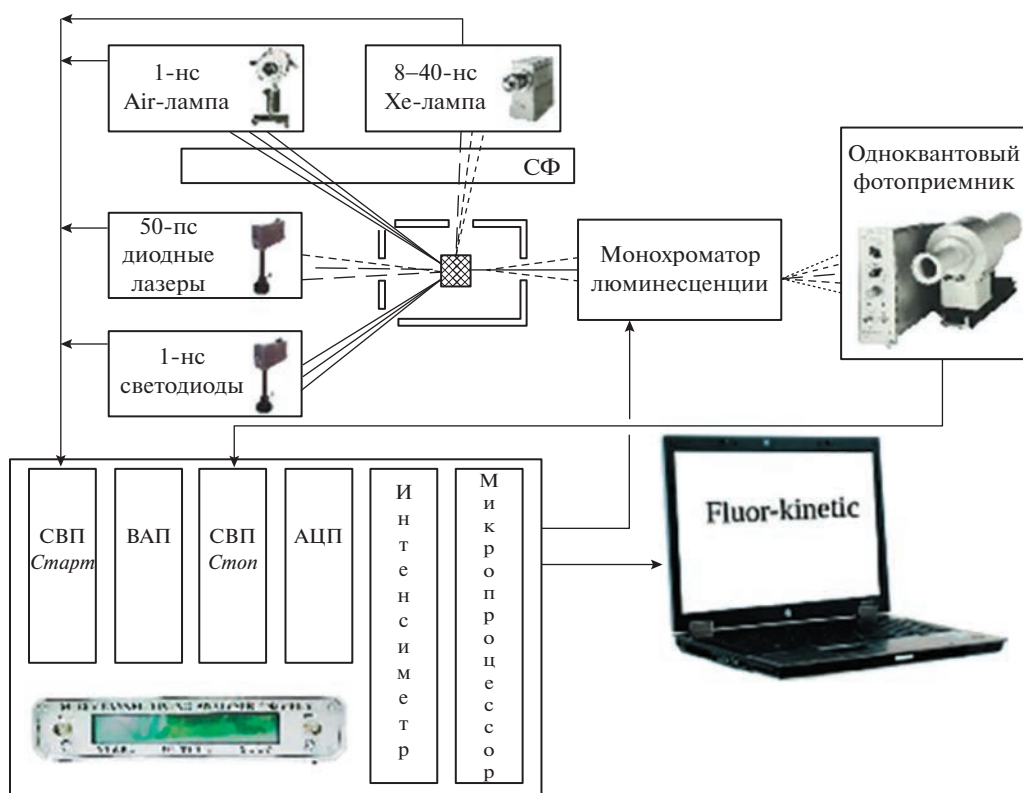


Рис. 1. Функциональная схема одноквантового кинетического спектрометра ФЛУОР. СВП – схема временной привязки сигналов, СФ – светофильтры; ВАП – времяамплитудный преобразователь.

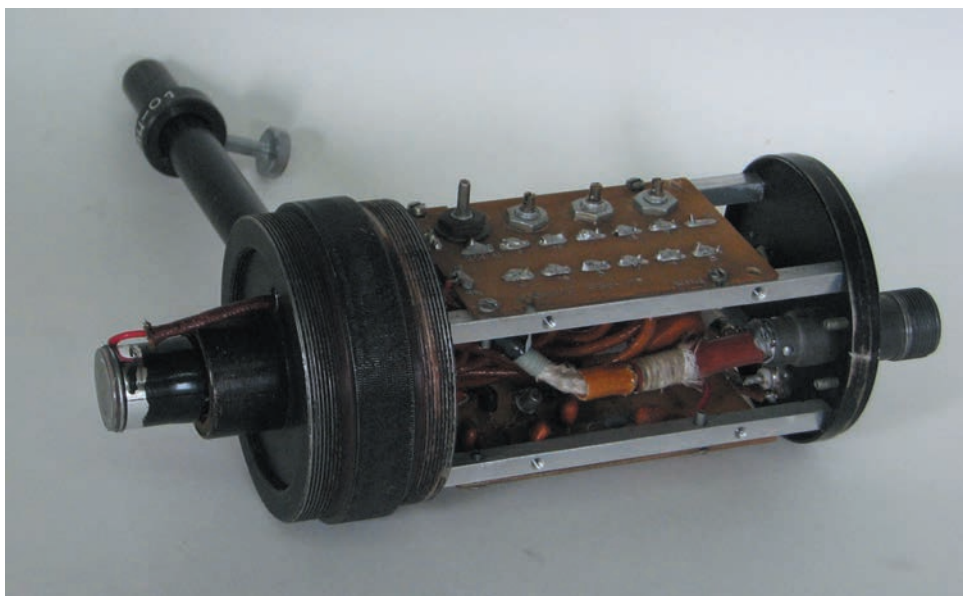


Рис. 2. Внешний вид одноквантового фотоприемника на основе ФЭУ-175, ФЭУ-186.

пряжения питания фотоумножителя и малошумящий импульсный усилитель. На задней панели установлены высоковольтный, 4-штырьковый низковольтный и два радиочастотных разъема.

Для крепления ОФП в оптической системе спектрометра предусмотрена специальная металлическая стойка. Внешний вид ОФП на основе данных ФЭУ приведен на рис. 2.



Рис. 3. Плата первичной обработки одноэлектронных сигналов ФЭУ, включающая в себя усилитель и временную привязку к постоянной части импульса. Размер платы 81 × 51 мм.

В ряде модификаций ОФП комплектуется более совершенной платой первичной обработки одноэлектронных сигналов, которая содержит импульсный усилитель и схему временной привязки к постоянной части импульса [5]. Такая компоновка повышает помехоустойчивость как самого фотоприемного устройства, так и кинетического спектрометра в целом. В последних вариантах ОФП входной усилитель выполнен на быстродействующем операционном усилителе AD8000 с токовой обратной связью по схеме преобразователя ток–напряжение с коэффициентом 0.5 мА/В. Это позволило уменьшить влияние паразитных емкостей на входной сигнал и обеспечить хорошую помехозащищенность при простоте и надежности схемы (рис. 3).

Для измерения временных характеристик ФЭУ в качестве источников коротких световых импульсов применялись разработанные в Белорусском государственном университете компактные пикосекундные диодные лазеры, предназначенные для широкого класса оптоэлектронных устройств [6]. В силу важности хроматических зависимостей временных характеристик ФЭУ было использовано излучение пяти лазеров в спектральном диапазоне 405–780 нм с длительностями импульсов на полувысоте: 70 пс (405 нм); 120 пс (460 нм); 130 пс (514 нм); 90 пс (650 нм); 180 пс (780 нм). Эти источники света состоят из блока оптического излучателя и внешнего блока питания и работают в режиме как внутреннего, так и

внешнего запуска. Достоинством данных лазеров являются компактность, а также низкие уровни питания (12 В) и потребляемой мощности (3 Вт). Их внешний вид представлен на рис. 4.

Временные характеристики фотоумножителей оценивались при использовании их в качестве фотодетекторов в одноквантовом кинетическом спектрометре ФЛУОР диапазона 0.1 нс–100 мкс. Организацию измерений и электронную обработку сигналов в спектрометре осуществлял компактный электронный блок, реализующий измерения кинетики повторяющихся световых процессов в режиме времякоррелированного счета фотонов [7]. Данный блок может быть использован для измерения кинетики различных видов люминесценции (при ламповом, лазерном, рентгеновском и других типах возбуждения), а также динамики свечения разных световых объектов (гетероструктур и т.п.). Прибор выполнен в малогабаритном блочном корпусе Unicas SL-3 фирмы Metcase (рис. 5).

Электронный блок содержит полный набор функциональных схем, обеспечивающих организацию измерений кинетики световых процессов в режиме времякоррелированного счета фотонов. Он осуществляет обработку сигналов от первичных источников возбуждения (искровых ламп, лазеров, рентгеновских пушек и др.) и от одноквантовых детекторов вторичного свечения — люминесценции и т.п.; селекцию и преобразование статистического потока временных интерва-



Рис. 4. Пикосекундные диодные лазеры в двух компоновках (один из блоков для наглядности изображен со снятой боковой крышкой).



Рис. 5. Компактный электронный блок времякоррелированного счета фотонов одноквантового спектрометра ФЛУОР в корпусе Unicas SL-3.

лов в цифровой код и передачу информации в компьютер. Данный блок в комплекте с компьютером представляет собой многоканальный временной анализатор типа старт–стоп.

В состав электронного блока входят следующие электронные схемы:

1) схема временной привязки (СВП, см. рис. 1) сигналов *старт* (от источников возбуждения: искровых ламп, лазеров, рентгеновских пушек и др.), работающая по методу дифференцирования;

2) СВП сигналов *стоп* от одноквантовых фотоприемников, работающая по методу фиксации постоянной части импульса;

3) схема цифровой задержки сигнала *старт* в диапазоне 1–100 нс (для компенсации задержки сигнала *стоп* в одноквантовом фотоприемнике);

4) 11-диапазонный преобразователь время–амплитуда (ВАП) типа старт–стоп с системой отбора парных старт–стоп-событий и рабочими временными интервалами от 50 нс до 100 мкс;

5) 14-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП);

6) 20-разрядный жидкокристаллический индикатор для одновременного отображения частоты старт-, стоп- и парных коррелированных событий;

7) USB-канал связи с компьютером (могут устанавливаться Ethernet, Bluetooth, Wi-Fi).

Функционирование блока обеспечивает пакет прикладных программ. Рабочие диапазоны временных измерений электронного блока 50, 100, 200, 500 нс, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 мкс; максимальная частота регистрируемых парных коррелированных сигналов 50 кГц; достижимая дифференциальная нелинейность временной шкалы 1%; разрешение во времени для электрических сигналов 20 пс (для диапазона 50 нс).

С точки зрения разработчиков и пользователей однофотонной времяизмерительной аппаратуры на основе ФЭУ, важнейшими параметрами фотоумножителей являются:

а) обнаружительная способность (в частности, отношение сигнал/шум);

б) разрешение во времени:

— аналоговое (длительность импульсной характеристики),

— хроноскопическое (точность фиксации временного положения детектируемых сигналов — джиттер Dt_j).

При формально достаточно большой номенклатуре предлагаемых производителями фотоумножителей в реалии в силу целого ряда объективных причин потребителям приходится эксплуатировать доступные приборы, максимально подходящие для конкретных приборных реализаций. В частности, во многих случаях в одноэлектронном режиме используются быстродействующие фотоумножители, для которых данный режим нормативно не детерминирован.

На практике сложился эксплуатационный критерий реализации высокой обнаружительной способности ФЭУ: рабочее напряжение $U_{фэу}$ должно соответствовать середине счетной характеристики ФЭУ, а порог дискриминации одноэлектронных импульсов $U_{ои-д}$ — локальному минимуму в распределении амплитуд одноэлектронных импульсов (между обратноэкспоненциальной ветвью шумовой компоненты импульсов и сигнальным одноэлектронным пиком).

Вместе с тем, у ряда быстродействующих фотоумножителей с острой фокусировкой электронных лавин, в частности у ФЭУ-87, распределение сигнальных одноэлектронных импульсов имеет обратноэкспоненциальный вид, как и шумовая компонента. Как итог, распределения амплитуд одноэлектронной и шумовой компонент достаточно сильно накладываются друг на друга,

и это усложняет алгоритм выбора порога дискриминации $U_{ои-д}$, а следовательно, и всей процедуры оптимизации рабочего режима ФЭУ.

Уровень шумовых импульсов фотоприемника в целом определяет пороговые характеристики детектирования. Главными составляющими шумовых импульсов являются:

— тепловой шум, вызванный тепловыми флуктуациями носителей заряда;

— дробовой шум источника излучения и фона;

— флуктуационный шум, обусловленный статистической природой усиления сигнала;

— шум последующей электронной цепи.

В рамках уже сложившихся на практике реалий по асимметричному распределению потенциалов в катодной камере и на диодных промежутках, а также по подбору оптимальных рабочего напряжения питания $U_{фэу}$ и порога дискриминации $U_{ои-д}$ были выполнены измерения следующих характеристик ФЭУ-175, ФЭУ-186:

а) распределения амплитуд одноэлектронных сигналов;

б) счетные распределения;

в) дисперсия времен прохождения сигналов (джиттера Dt_j).

Распределение амплитуд одноэлектронных сигналов $N_{раои} = N(U_{ои})$, т.е. распределение числа зарегистрированных импульсов с амплитудой $U_{ои}$, измерялось для случая, когда делитель напряжения питания ФЭУ был оптимизирован на минимальное значение джиттера Dt_j . Измерения проводились методом пошаговой дискриминации амплитуд $U_{ои}$. Типичные измеренные интегральные распределения амплитуд одноэлектронных сигналов данных фотоумножителей представлены на рис. 6.

Согласно рис. 6, шумовая и одноэлектронная компоненты сигнала фотоумножителей ФЭУ-175 и ФЭУ-186 накладываются друг на друга, что является следствием острой фокусировки электронных лавин. Одноэлектронный пик при этом практически не наблюдается, что усложняет выбор оптимального порога дискриминации $U_{ои-д}$.

Счетное распределение $N_{ои} = N(U_{фэу})$ числа одноэлектронных импульсов $N_{ои}$ как функция рабочего напряжения фотоумножителя $U_{фэу}$ измерялось для ФЭУ-175 и ФЭУ-186 при трех фиксированных порогах дискриминации $U_{ои-д}$: 25, 50 и 75 мВ. Счетные характеристики были измерены как при стандартном включении фотоумножителей, так и при отключенном фотокатоде — с подачей питания на 1-й диод, что позволяет оценить вклад диодных шумов (рис. 7). Из представленных результатов видно, что у обоих приборов имеется плато счетной характеристики протя-

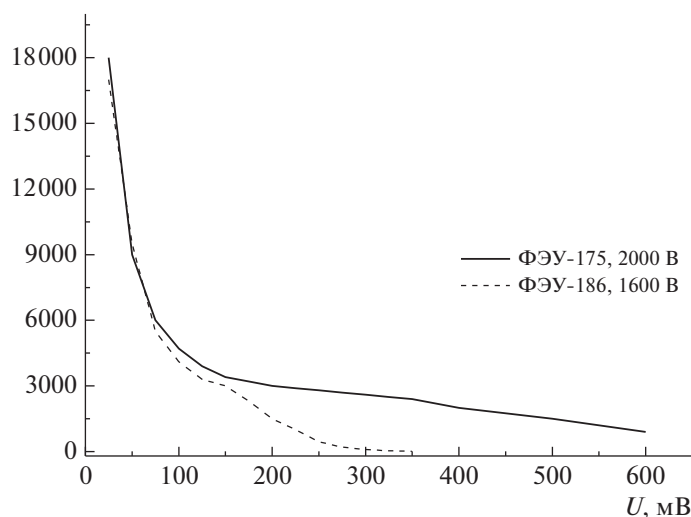


Рис. 6. Интегральные распределения амплитуд одноэлектронных импульсов ФЭУ-175, ФЭУ-186.

женностью примерно 200 В, хотя наклон этого плато достаточно существен.

Вид измеренных распределений амплитуд одноэлектронных сигналов и счетных характеристик (см. рис. 6 и 7) свидетельствует о том, что у обоих экземпляров фотоумножителей одноэлектронная компонента не имеет ярко выраженного пика и не отделена от шумовой компоненты. Это предполагает тщательность выбора как порога дискриминации $U_{\text{ои-д}}$, так и самого алгоритма фиксации временного положения одноэлектронных сигналов.

Временные и усилительные характеристики ФЭУ определяются процессами в его катодной камере и умножительной системе. Существующая взаимосвязь данных параметров вызвана самим механизмом формирования одноэлектронного сигнала, который представляет собой совокупность актов умножения отдельных электронных лавин. Вместе с тем данная взаимосвязь недостаточно жесткая, что может быть причиной несовпадения временных и счетных режимов работы фотоумножителей. Причинами разброса времен пролета отдельных электронных лавин ФЭУ могут служить 4 фактора:

- различие в начальных скоростях фотоэлектронов, вылетающих из фотокатода;
- разброс начальных скоростей фотоэлектронов по поверхности фотокатода;
- дисперсия времени пролета в умножительной системе;
- процессы выделения сигнала в анодной нагрузке.

В силу статистического процесса умножения электронов в диодной системе фотоумножителей их выходные одноэлектронные сигналы име-

ют существенный разброс по величине тока (или соответственно напряжения). Для минимизации влияния статистического разброса величины одноэлектронных импульсов на разрешение во времени кинетических спектрометров применяются схемы фиксации их временного положения — так называемые схемы временной привязки. В практике одноквантовой спектрометрии наиболее часто используют схемы временной привязки, работающие по методу фиксации постоянной части импульса. В данных электронных схемах одноэлектронные сигналы дискриминируются по амплитуде, и важнейшим аспектом, наряду с выбором рабочего напряжения фотоумножителя $U_{\text{фэу}}$, становится оптимизация порога дискриминации одноэлектронных импульсов $U_{\text{ои-д}}$.

Дисперсии времен прохождения сигнала Dt_j (джиттер) фотоэлектронных умножителей оценивались по длительности отклика на излучение описанных выше пикосекундных диодных лазеров с длительностью на полувысоте 70–180 пс. Собственное разрешение во времени электрических трактов спектрометра оценивалось в 40 пс, а погрешность измерения времени за счет соответствующей статистики отсчетов достигала 1%. За дисперсию Dt_j фотоумножителей в линейном приближении принималась величина

$$Dt_j = (t_r^2 - t_l^2 - t_{sp}^2)^{-1/2}, \quad (1)$$

где t_r — длительность на полувысоте измеренного спектрометром отклика на излучение лазера; t_l — полуширина импульса лазера; t_{sp} — джиттер электронных трактов спектрометра.

По результатам измерений установлено, что оба фотоумножителя, ФЭУ-175 и ФЭУ-186, обладают примерно одинаковыми дисперсионно-временными характеристиками. На рис. 8 представ-

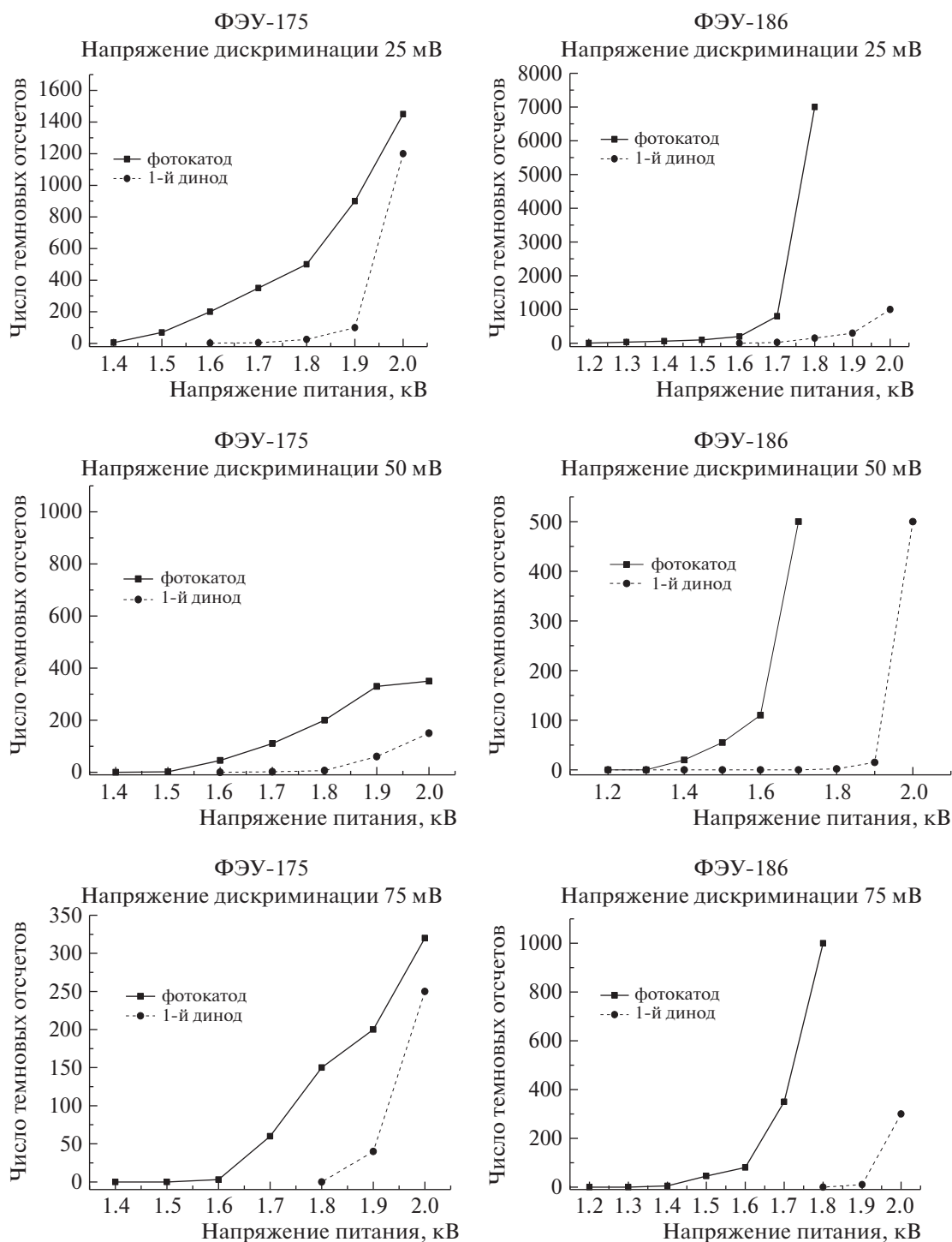


Рис. 7. Счетные характеристики фотоумножителей ФЭУ-175 и ФЭУ-186 при подключенном и отключенном (с подачей питания на 1-й динод) фотокатодах и разных напряжениях дискриминации амплитуд одноэлектронных импульсов $U_{\text{он-д}}$: 25, 50 и 75 мВ.

лены зарегистрированные отклики ФЭУ-175 на излучение диодных лазеров с длинами волн 405 и 514 нм. Пересчет по формуле (1) для ФЭУ-175 на длине волны 514 нм дает величину джиттера Dt_r меньше 0.45 ± 0.05 нс.

Безусловный интерес представляют хроматические (спектральные) зависимости джиттера от длины волны детектируемого света. Они возникают вследствие флуктуаций времен пролета

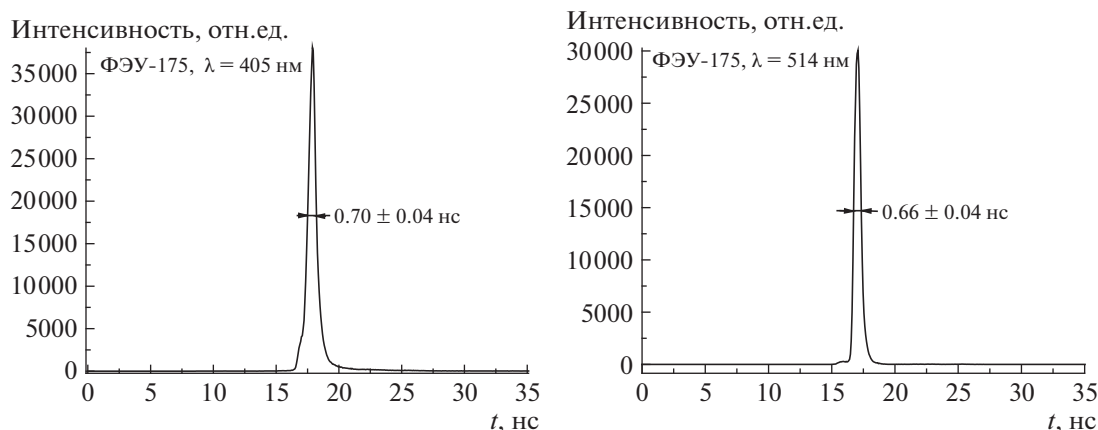


Рис. 8. Измеренные одноквантовым спектрометром с детектором ФЭУ-175 отклики на излучение диодных лазеров с длительностью на полувысоте 70 и 130 пс с длинами волн 405 и 514 нм.

электронов Dt_v из-за разброса начальных скоростей фотоэлектронов Dv_0 :

$$Dt_v = mDv_0/(eE), \quad (2)$$

где m и e — соответственно масса и заряд электрона; E — напряженность электрического поля в промежутке фотокатод—1-й диод.

Хроматические флуктуации Dt_v являются следствием зависимости начальных скоростей фотоэлектронов Dv_0 от энергии (длины волны) падающего света. Для измерения флуктуаций Dt_v фотоумножителей ФЭУ-175, ФЭУ-186 были использованы диодные лазеры с длинами волн 405, 460, 514, 650 и 780 нм, их длительности составляли соответственно 70, 120, 130, 90 и 180 пс. Измерения показали, что у этих фотодетекторов джиттер для вышеуказанных длин волн изменялся незначительно — от 0.48 до 0.40 нс, что, вероятно, является следствием высокой напряженности E электрического поля у фотокатода, которое нивелирует флуктуации Dv_0 .

Таким образом, фотоумножители ФЭУ-175 и ФЭУ-186 были успешно использованы в качестве фотодетекторов в одноквантовых флуорометрах для измерения кинетики быстрой флуоресценции рентгеновских люминофоров CsPbBr_3 [8] и индотрикарбоцианиновых красителей в биологических растворах [9].

По результатам испытаний можно сделать выводы, что быстродействующие фотоэлектронные умножители ФЭУ-175 и ФЭУ-186 имеют хорошие временные параметры: время нарастания импульсной характеристики 1.5 нс, разброс времени прохождения сигналов ≤ 0.4 нс — и могут исполь-

зоваться в качестве фотодетекторов в одноквантовых кинетических спектрометрах с субнаносекундным разрешением и в других быстродействующих оптоэлектронных регистраторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Demas J.N. Exited state lifetime measurements. NY., London: Academy Press, 1983.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-208920-6.x5001-0>
2. Lakowicz J.R. Principles of fluorescence spectroscopy. 3rd ed. NY.: Springer, 2006.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-46312-4>
3. Hamamatsu. Photomultiplier tubes. Hamamatsu Photonics K.K. 2016.
4. Ветохин С.С., Ермалицкий Ф.А., Мельников С.М., Суханин С.В., Шойтов М.А. // ПТЭ. 1998. № 2. Р. 5.
5. Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Самцов М.П. // ПТЭ. 2020. № 6. С. 125.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220060051>
6. Воронай Е.С., Ермалицкая К.Ф., Ермалицкий Ф.А., Радько А.Е., Ржеуцкий Н.В., Самцов М.П. // ПТЭ. 2022. № 1. С. 100.
<https://doi.org/10.31857/S003281622010232>
7. Воронай Е.С., Ермалицкий Ф.А., Каплевский К.Н., Радько А.Е. // ПТЭ. 2016. № 4. С. 156.
<https://doi.org/10.7868/S0032816216040157>
8. Dendebera M., Chornodolsky Ya., Gamernyk R., Antonyak O., Pashuk I., Myagkota S., Gnilitkyi I., Pankratov V., Visnovsky V., Mykhaylyk V., Grinberg M., Voloshinovskii A. // Journal of Luminescence. 2020. V. 225. P. 117346.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117346>
9. Белько Н.В., Самцов М.П., Тихомиров С.А., Буганов О.В. // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. Т. 87. № 5. С. 752.
<https://doi.org/10.1007/s10812-020-01078-z>