

6
А-53

На правах рукописи

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Томский ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени политехнический институт
имени С.М.Кирова

РЕЗНИКОВ Игорь Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРЕДЕЛЬНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОЭЛЕКТРОННОГО МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ

(05.12.10 – Электровакуумные и газоразрядные
приборы и технология их производства)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Т о м с к, 1974 г.

На правах рукописи

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Томский ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени политехнический институт
имени С.М.Кирова

РЕЗНИКОВ Игорь Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРЕДЕЛЬНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОЭЛЕКТРОННОГО МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ

(05.12.10 – Электровакуумные и газоразрядные
приборы и технология их производства)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Т о м с к, 1974 г.

Работа выполнена в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени государственном университете имени В.И.Ленина.

Научные руководители: доктор технических наук, заведующий кафедрой ядерной физики и мирного использования атомной энергии, профессор ШУШКЕВИЧ С.С., БГУ, кандидат физико-математических наук доцент ПЕРЦЕВ А.Н., БГУ.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, директор НИИ электронной интроскопии при ТПИ, профессор ГОРБУНОВ В.И., кандидат технических наук, доцент ГОСЬКОВ П.И., ТИАСУР.

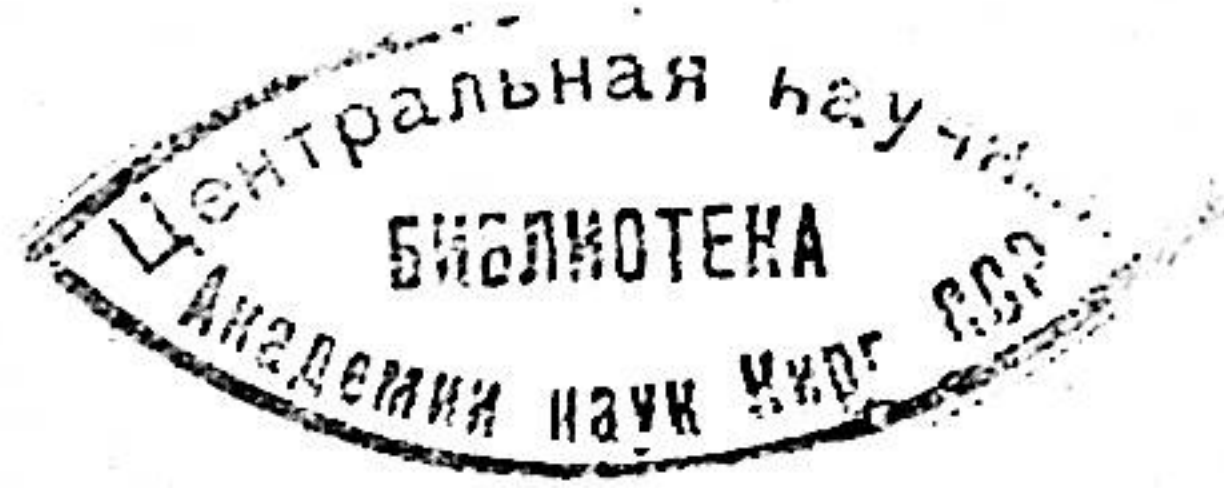
Ведущая организация – ОИВ при Московском заводе электровакуумных приборов.

Автореферат разослан "6" марта 1974г.

Защита диссертации состоится 10 апреля 1974г. в актовом зале на заседании Совета по присуждению ученых степеней по радиотехнике и электронике Томского ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени политехнического института имени С.М.Кирова (634004, г.Томск, пр.Ленина 30). С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института. Просим принять участие в работе Совета или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью.

Ученый секретарь
института

А.П. Беляева



Усовершенствование методов регистрации, ведущее к увеличению точности измерений и повышению чувствительности, сопровождается обнаружением новых явлений и расширением круга доступных решению задач. За последние 10 лет быстро развивались методы регистрации предельно слабых световых потоков, вплоть до возможности регистрации отдельных световых квантов. Это стало возможным благодаря детальному изучению свойств фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и разработкам новых типов этих приборов. С помощью таких ФЭУ был реализован дискретный метод регистрации фотонов оптического диапазона, получивший название одноэлектронного метода регистрации (или однофотонного статистического метода измерения). Этот метод успешно используется в физике, астрофизике, медицине, биологии и различных областях техники.

Успехи, связанные с применением одноэлектронного метода, стимулировали, в свою очередь, дальнейшее усовершенствование возможностей самого метода. Последнее нашло отражение как в улучшении параметров ФЭУ, так и в разработках различных установок, реализующих одноэлектронный режим оптимальным образом.

Предлагаемая работа подводит итоги более чем десятилетнего опыта работы автора по изучению предельных возможностей одноэлектронного метода и созданию метрологической базы.

Основное направление представленной работы связано

с исследованием факторов, влияющих на порог чувствительности ФЭУ и диссекторов в одноэлектронном режиме, и разработкой на базе одноэлектронного метода измерительных систем с большими временами усреднения.

Диссертация состоит из пяти глав.

Первая глава посвящена анализу факторов, влияющих на предельную чувствительность фотоумножителей, и изложению специфических особенностей одноэлектронного режима измерения. При использовании последнего как сигнал, так и шум представляют собой последовательность статистически распределенных во времени импульсов тока, создаваемых одиночными электронами. Благодаря этому проблема отношения сигнал/шум переводится в область статистики отсчетов, то есть в область, где отношение сигнал/шум определяется временем измерения и является динамической величиной (для стационарных потоков). Предельная чувствительность ФЭУ при фиксированном времени измерения определяется шумовыми характеристиками ФЭУ — компонентами тока на выходе ФЭУ, не связанными непосредственно с интенсивностью регистрируемого светового потока.

Источники темнового тока делятся на внешние и внутренние. К первым относятся космическое излучение и радиоактивные излучения окружающей среды. Внутренние источники включают термоэлектронную и автоэлектронную эмиссии фотокатода и динодов, радиоактивное излучение K^{40} , фосфоресценцию стекла колб ФЭУ, оптическую и ионную обратную связь, молтеровскую эмиссию с поверхности динодов; к ним также

примыкают фликкер-эффект фотокатода и эффект флюктуации коэффициентов вторичной эмиссии динодов. С помощью защиты, конструктивных мер и амплитудной дискриминации удается эффективно снизить вклад ряда источников, однако, такие источники, как термоэлектронная и автоэлектронная эмиссия, излучение K^{40} , фосфоресценция стекла, принципиально не могут быть исключены полностью и ими в большинстве случаев определяется достижимый порог чувствительности ФЭУ.

Реализация одноэлектронного режима измерения связана с формой счетной характеристики ФЭУ: наличие плато счетной характеристики, как правило, свидетельствует о пригодности ФЭУ для использования в данном режиме. Выбор рабочего напряжения питания на плато счетной характеристики стабилизирует уровень шумов и позволяет осуществлять сознательный подход к минимизации этого уровня. Однако, даже при выполнении этих операций состав шумовых импульсов остается неоднородным и, как правило, уровень шумов намного превышает вклад импульсов термоэлектронного происхождения. Последнее заставляет изыскивать дополнительные методы снижения уровня шумов. В отличие от спектрометрического режима данные о стабильности параметров ФЭУ при длительной работе в одноэлектронном режиме отсутствуют. Наконец, трудоемкость процедуры отбора "одноэлектронных" ФЭУ заставляет искать более быстрые методы отбора.

Экспериментальному изучению изложенных задач посвящена вторая глава. Измерения проводились на установке, реализующей квазиодновременный метод счета одноэлектронных

импульсов с применением многоканального анализатора и реперного сигнала. Дополнительно применялись временные методы анализа. Использование последних позволило установить (на примере ФЭУ-1А), что при развитии газоразрядных процессов ионная обратная связь предшествует оптической обратной связи и сопровождается появлением большого числа импульсов малой амплитуды, маскирующих одноэлектронный пик. Этот эффект часто искажает форму счетной характеристики. Для устранения эффекта предложена модифицированная методика измерения счетной характеристики: одноэлектронный пик каждый раз (при изменении напряжения питания ФЭУ) помещается в одну и ту же область шкалы амплитуд, а порог дискриминации устанавливается в переходной области от одноэлектронного пика к области малых амплитуд. Модифицированная методика удлиняет плато счетных характеристик, а в ряде случаев позволяет обнаружить плато, не проявляющееся при использовании обычной методики. С помощью модифицированной методики измерения счетной характеристики были изучены шумовые параметры ФЭУ-64 и ФЭУ-79 (около 100 экземпляров). Измерялись счетные характеристики, уровень шумов, крутизна и протяженность плато (при его наличии), пуассоновский параметр одноэлектронного амплитудного распределения. Получены средние одноэлектронные характеристики этих типов ФЭУ. Выход "одноэлектронных" ФЭУ составлял 30-40%. Наблюдаемые одноэлектронные характеристики сопоставлялись с паспортными данными ФЭУ-64 и ФЭУ-79; выяснилось, насколько

ко они коррелируют. Наличие корреляции означает возможность экспрессного отбора одноэлектронных ФЭУ на основе паспортных данных. Оказалось возможным ввести критерий

$$\varepsilon = \frac{I_T(U_2)}{I_T(U_1) \cdot 10},$$

где $I_T(U_2)$ и $I_T(U_1)$ - темновой ток ФЭУ при отношении анодных чувствительностей, равном 10 (по паспортным данным).

При $\varepsilon \leq 1$ вероятность обнаружения хороших одноэлектронных характеристик составляет 0,8 для ФЭУ-79 и 0,7 для ФЭУ-64.

Влияние длительной эксплуатации одноэлектронных ФЭУ изучено на примере ФЭУ-1А (сроки эксплуатации составляют более 10 лет): с течением времени спектральная чувствительность фотокатода остается неизменной, а одноэлектронные характеристики изменяются в лучшую сторону. Например, уровень шумов для одного из экземпляров ФЭУ снизился с 60 с^{-1} до $2,8 \text{ с}^{-1}$ ($10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^2$).

Одноэлектронный метод измерения был успешно применен для другого вида приборов - диссекторов ЛМ-604 и ЛМ-605-1; результаты изучения их одноэлектронных характеристик анализируются в конце второй главы.

В третьей главе излагаются результаты действия засветки на уровень шумов ФЭУ и параметры амплитудного распределения выходных импульсов. Это влияние в общем случае может проявляться как в виде "эффектов памяти" - добавочных импульсов на выходе ФЭУ после прекращения действия сигнала.

ла, так и в виде безынерционной составляющей, существующей во время действия сигнала. Особенности одноэлектронного режима измерения позволяют получить дополнительные сведения о природе действия засветок на характеристики ФЭУ. Засветка ФЭУ в видимой области (как стационарного, так и импульсного характера) сопровождается незначительным увеличением уровня шумов; при скорости счета 10^4 с^{-1} для ФЭУ-1А обнаружены изменения в величине пуассоновского параметра амплитудного распределения одноэлектронных импульсов и отклонения от линейности между интенсивностью входного и выходного сигнала. Отсюда следует оценка верхней границы применения одноэлектронного метода для данных типов ФЭУ. Величина оценки согласуется с данными других авторов. Действие инфракрасной засветки носит более сложный характер: а) при отсутствии измеряемого потока ИК-подсветка вызывает безынерционное увеличение шумов, зависящее от длины волны ИК-подсветки, б) это увеличение шумов обусловлено вылетом электронов со стенок входной камеры, в) при наличии ИК-подсветки спектральная чувствительность ФЭУ в видимой области снижается, что особенно заметно в переходной области спектральной характеристики (в области $500 + 600 \text{ нм}$ находится граница между основным и примесным фотоэффектами). При этом эффекты а) и б) почти компенсируют друг друга. Уменьшение спектральной чувствительности ФЭУ при действии ИК-засветки объясняется в рамках зонной модели сурьмяно-цезиевого фотокатода. Освещение в ультрафи-

олетовой области спектра приводит к резкому увеличению уровня шумов с большим временем спада до первоначального значения. Явно выражены две составляющие спада с постоянными 300 с и $5 \cdot 10^5 \text{ с}$. Возрастание скорости счета шумовых импульсов оказалось наибольшим для засветок в области длин волн $280 + 330 \text{ нм}$. Дополнительные измерения показали, что этот эффект связан с фосфоресценцией стекла колбы ФЭУ, точнее - с фосфоресценцией стекла входного окна. Такие же выводы получены для действия УФ-засветки диссекторов.

Влияние фактора освещенности на уровень шумов ФЭУ (а, следовательно, и на пороговую чувствительность) и выделение роли УФ-засветки поставило вопрос о более детальном изучении оптических свойств стекол окон ФЭУ. Этой теме посвящена четвертая глава.

Исследовались спектры пропускания и поглощения образцов окон ФЭУ, люминесценции (высвечивания и возбуждения), термолюминесценции (в значительной мере определяющие температурные границы применимости ФЭУ), спектры фосфоресценции, спектры ЭПР. Последние использовались для выяснения связи интенсивности фосфоресценции облученных образцов с наличием радиационных нарушений, возникших в результате облучения.

Изучались следующие образцы стекол окон ФЭУ: УТ-49, УТ-88, КУ-1, С-89-2, С-52-1, сапфир. Спектры поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра измерялись

с помощью спектрофотометра СФ-4, спектры поглощения в ИК-области - с помощью ИКС-14 и УР-10. Спектры люминесценции регистрировались на установке с одноэлектронной регистрацией; интенсивность фосфоресценции также измерялась одноэлектронным методом. Для изучения термолюминесценции была сконструирована специальная установка.

Спектры поглощения образцов, облученных светом лампы ПРК, существенно отличались от таковых для необлученных и предварительно отожженных образцов. Максимальной люминесценцией обладают чистые вещества (кварц, сапфир). Чем больше примесей, нарушающих структуру главного стеклообразователя, тем меньше интенсивность люминесценции. С точки зрения величины фосфоресценции наиболее подходящими являются окна из молибденового стекла и сапфиров. Совершенно не была обнаружена фосфоресценция слюды. Термолюминесценция отсутствует у молибденового стекла и очень мала у образцов УТ-49; для остальных образцов характерно наличие одной или нескольких энергий активации. Спектры ЭПР измерялись для образцов УТ-49, С-95-2, С-52-1: сигнал ЭПР не был обнаружен у молибденового образца и был наибольшим от увиолевого стекла. Сравнение интенсивности сигнала ЭПР в функции времени облучения с поведением интенсивности фосфоресценции для образцов С-95-2 привело к выводу, что за возникновение сигнала ЭПР ответственны центры фосфоресценции. Дозированный отжиг образцов, обнаружива-

ющих фосфоресценцию, позволяет эффективно снижать уровень интенсивности фосфоресценции; оптимальный режим температуры и времени отжига были определены экспериментально.

Полученные данные дали возможность выработать практические рекомендации по использованию материалов для изготовления входных окон ФЭУ, осуществлять прогнозирование количества импульсов, обусловленных фосфоресценцией стекла, и разработать методику дозированного отжига ФЭУ для снижения "наведенных" засветкой шумов.

В пятой главе описан ряд разработанных в процессе выполнения работы установок, реализующих предельные характеристики одноэлектронного метода регистрации.

Установка для регистрации спектров люминесценции и возбуждения состоит из источника возбуждения, двойного монохроматора, исследуемого объекта, спектрографа и системы регистрации. Световой поток на входе спектрографа модулируется механическим прерывателем (предусмотрена также модуляция возбуждающего потока). Система регистрации состоит из ФЭУ в одноэлектронном режиме, усилителя, дискриминатора, реверсивного счетчика, записывающего устройства и может функционировать в автоматическом и неавтоматическом режимах. Для расширения чувствительности детектора в УФ-область использовался конвертор на основе полистирола с добавлением 2% терфенила и 0,1% РОРОР-а 1,4 ди 2(5-фенил)-оксазолил-1,3 -бензол; толщина конвертора 0,2

мм) соответствовала полному поглощению ультрафиолетового излучения в диапазоне 220 + 380 нм. Для градуировки установки по интенсивности в УФ-области предложен удобный метод с абсолютной точностью 5 - 7%. Высокая чувствительность позволила измерить спектры люминесценции биологически важных субстратов, таких как нуклеиновые кислоты, нуклеопро-теиды и другие, без нарушения нативности препаратов (так, люминесценция ДНК в нейтральных водных растворах не была обнаружена ранее из-за крайне малого квантового выхода; впервые в 1965 г. на этой установке была измерена люминесценция ДНК при pH 7,1 и pH 11). На основе этой установки был создан ряд регистраторов (в том числе и удостоенный золотой медали на ВДНХ СССР в 1970 г. прибор КМСФ-5). К другим описанным в данной главе установкам относятся: а) прибор для количественного определения катехоламинов в тканях животного организма (с чувствительностью 10^{-6} кг. $\cdot$ м $^{-3}$ по адреналину и 10^{-7} кг. $\cdot$ м $^{-3}$ по флюоресцеину натрия); б) установка для измерения биохемилюминесценции; в) установка для измерения термолюминесценции; г) растровая установка на базе диссектора в одноэлектронном режиме для обнаружения слабо светящихся микрообъектов.

Результаты измерений слабых световых потоков различного происхождения позволяют сделать вывод, что использование фотоэлектронных приемников в одноэлектронном режиме приводит к расширению диапазона применения оптических методов исследования структуры веществ. Последнее непосред-

ственно обусловлено высокой чувствительностью применяемого метода.

ВЫВОДЫ

1. Шумовые импульсы, определяющие пороговую чувствительность ФЭУ, создаются термоэлектронной эмиссией фото-катода, ионной и оптической обратной связью, люминесценцией стекла колбы ФЭУ, распадом K^{40} , космическим излучением и другими источниками.

2. Показано, что развитие ионной обратной связи пред-шествует развитию оптической обратной связи и характери-зуется появлением большого числа импульсов со средней ам-плитудой, которая меньше средней амплитуды одноэлектрон-ных импульсов.

3. Предложена модифицированная методика измерения счетной характеристики ФЭУ и диссекторов, позволяющая опре-делить истинные границы реализуемости одноэлектронного ме-тода.

4. Измерены одноэлектронные характеристики ФЭУ-64 и ФЭУ-79, выявлена корреляция между одноэлектронными харак-теристиками и паспортными данными и предложен вероятност-ный критерий отбора одноэлектронных ФЭУ на основе паспорт-ных данных.

5. Показано, что длительное использование ФЭУ-1А в

одноэлектронном режиме и в стационарных условиях значительно улучшает пороговую чувствительность этих ФЭУ, при этом асимптотическая величина шумовых импульсов составляет менее 1 с^{-1} на квадратный сантиметр фотокатода.

6. Обнаружено, что освещение ФЭУ в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра оказывает различное влияние на пороговые свойства ФЭУ. Влияние освещения в видимой области спектра носит безынерционный характер и сказывается лишь на загрузочных характеристиках: при скорости счета порядка 10^4 импульсов в секунду наблюдается уменьшение пуассоновского параметра амплитудного одноэлектронного распределения ФЭУ-1А. Влияние освещения в инфракрасной области также является безынерционным и имеет сложный характер. При этом изменяется спектральная чувствительность фотокатода и увеличивается число шумовых импульсов. Освещение ультрафиолетом приводит к увеличению уровня шумовых импульсов за счет фосфоресценции и люминесценции стекла колбы ФЭУ. Последнее зависит от сорта стекла.

7. Изучены оптические свойства различных сортов стекол (спектры поглощения, возбуждения, люминесценции, фосфоресценции, термолюминесценции, ЭПР-спектры), применяемых для изготовления входных окон ФЭУ; разработаны практические рекомендации в отношении выбора сортов стекла и процедуры снижения интенсивности фосфоресценции окон ФЭУ.

8. Исследованы характеристики диссекторов, что позво-

лило рекомендовать их для работы в одноэлектронном режиме регистрации.

В. Разработан ряд целевых установок, реализующих одноэлектронный метод регистрации и подтверждающих высокую чувствительность и методологическую ценность обсуждаемого метода.

Результаты диссертации доложены на II Всесоюзной конференции по биолюминесценции в Новосибирске (декабрь 1967 г.), VI научно-технической конференции, посвященной дню радио и 50-летию Советской Белоруссии в Минске (май 1968 г.), Всесоюзном симпозиуме по сверхслабым свечениям в биологии в Москве (июнь 1969 г.), семинаре по автоматизации оптических методов измерения и контроля линейных и угловых величин в Москве (1971 г.), 3-м Всесоюзном семинаре по оптическим и электрооптическим методам и средствам передачи, преобразования, переработки и хранения информации в Москве (октябрь 1971 г.), конференции молодых ученых Белоруссии и Прибалтийских республик в Минске (март 1972 г.), 4-м Всесоюзном семинаре по оптическим и электрооптическим методам и средствам передачи, преобразования, переработки и хранения информации в Москве (1973 г.) и опубликованы в статьях: Приборы и техника эксперимента, №2, 150, 1965; №6, 167, 1968; №1, 175, 1970; №6, 165, 1970; №4, 253, 1971; №5, 163, 1971; №6, 141, 1971; №3, 187, 1973; №3,

258, 1973; Журнал прикладной спектроскопии, I, 83, 1964;
I, 303, 1964; 4, 265, 1966; 5, 789, 1966; 7, 957, 1967;
8, 509, 1968; 9, 701, 1968; 10, 166, 1969; 11, 718, 1969;
12, 952, 1970; 15, 506, 1971; 19, 370, 1973; 19, 957,
1973; Вестник БГУ имени В.И.Ленина, серия I, №2, 48, 1969;
№1, 67, 1972; №1, 48, 1973; Оптико-механическая промышлен-
ность, №9, 40, 1973; №10, 62, 1973; Лабораторное дело, №9,
560, 1970; Сборник "Вопросы радиобиологии", изд. БГУ име-
ни В.И.Ленина, Минск, 150, 1969; Доклады АН БССР, 17,
566, 1973.

Отпечатано на ротапринте РИЦ ЦСУ БССР

АТ 06412. Заказ №923. Тираж 200 экз. Подписано к печати
и свет 1.3.1974г.г.Минск, проспект Партизанский, 14