

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 53.07

ПРЕЦИЗИОННАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕРХСЛАБОГО ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ БИОКУЛЬТУР

© 2023 г. Н. В. Дунин^а, В. Б. Дунин^а, С. А. Савинов^а, А. С. Рыбаков^а,
С. Н. Майбуров^а, А. Н. Багдинова^{а,*}, Е. И. Демихов^а

^а Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский просп., 53

*e-mail: anna.bagdinova@gmail.com

Поступила в редакцию 06.05.2022 г.

После доработки 01.06.2022 г.

Принята к публикации 08.07.2022 г.

Разработана и изготовлена аппаратура для регистрации сверхслабого оптического излучения от биокультур. Создан малогабаритный блок регистрации оптического излучения в режиме счета фотонов на основе чувствительных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) со схемой дифференциального дискриминатора в каждом канале ФЭУ. Созданная четырехканальная система детекторов предназначена для регистрации и обработки электромагнитных колебаний, генерируемых микроорганизмами в активной и покоящихся фазах. Изучены характеристики излучения, испускаемого биокulturой сахаромикет *boulardii*.

DOI: 10.31857/S003281622206012X, EDN: JPDFQP

ВВЕДЕНИЕ

Сверхслабое оптическое излучение характеризуется низкой интенсивностью и временной структурой узких вспышек света. При детектировании данного излучения с помощью фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) существует проблема сепарации одноэлектронного полезного сигнала (импульс с шириной около 2–3 нс) от одноэлектронного сигнала темнового тока ФЭУ.

При использовании ФЭУ полезный сигнал от слабого оптического излучения является именно тем коротким и узким импульсом, который образуется при прохождении одноэлектронного заряда через ФЭУ. Существует проблема выделения полезного сигнала на фоне темнового тока ФЭУ и космического излучения. Причинами возникновения темнового тока могут быть: термоэмиссии от фотокатода и динодов; токи утечки (омическая утечка) между анодом и другими электродами внутри ФЭУ; фототок, создаваемый сцинтилляциями в стеклянной оболочке; автоэмиссионный ток; ток ионизации остаточных газов (ионная обратная связь). Также необходимо отделять одноэлектронные сигналы на фоне шумовых сигналов.

В данной статье описано устройство детекторной системы, осуществляющей селекцию одноэлектронных импульсов. Наличие встроенной схемы селекции на основе дифференциальных дискриминаторов позволяет отделять одноэлектронные импульсы от импульсов с большой ам-

плитудой и обеспечивает наличие энергетического окна для каждого из четырех каналов детекторной системы. Каждый из четырех ФЭУ может работать как в режиме детектирования, так и в режиме антисовпадения. Система характеризуется низким энергопотреблением (менее 4 Вт), широкой апертурой и полосой пропускания 4000 мГц.

ОПИСАНИЕ ДЕТЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ

Наиболее важными элементами созданной системы детекторов являются блоки детекторов фотонов. Блок детекторов фотонов включает в себя два одинаковых ФЭУ 9114В производства компании ET Enterprises с диаметром фотокатода 22 мм и полусферической формой катода. Выбор ФЭУ обусловлен оптимальным сочетанием максимально возможной входной апертуры (2π), рекордно низкими шумовыми характеристиками, относительно высоким быстродействием, что позволяет использовать ФЭУ 9114В для регистрации слабых сигналов био- и хемилюминесценции в режиме счета фотонов. Аналоговые импульсы тока на выходе обоих ФЭУ поступают на усилители-дискриминаторы, где преобразуются в ТТЛ-сигналы: логический ноль — от 0 до 0.3 В; логическая единица — от 2.5 до 3.3 В. Данное преобразование реализовано на базе двух микросхем: AD8014 и MAX9142 (Analog Devices и MAXIM). Микросхема AD8014 является быстродействующим операционным усилителем (ширина полосы

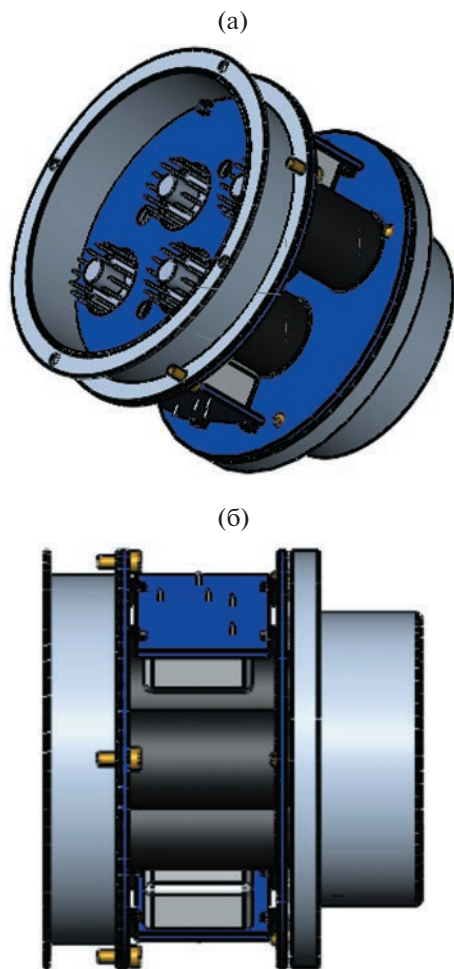


Рис. 1. Общий вид в проекции (а) и сечение (б) системы детекторов.

по уровню -3 дБ составляет 400 МГц, скорость нарастания фронта 4 кВ/мкс) с низким энергопотреблением ($I_{\max} = 1.15$ мА при $U_{\text{пит}} = 5$ В). Микросхема MAX9142 представляет собой быстродействующий и энергоэффективный компаратор напряжения (время задержки ~ 7 нс, ток потребления ~ 3.3 мА при $U_{\text{пит}} = 5$ В). Получаемые временные последовательности ТТЛ-импульсов от одноэлектронных детекторов оптических фотонов складываются и поступают на вход схемы антисовпадения.

Проекция общего вида системы представлена на рис. 1. Наличие четырех каналов, детектирующих слабое оптическое излучение, во-первых, увеличивает в четыре раза эффективную площадь сбора сигнала от изучаемой биокультуры и, во-вторых, позволяет продолжать нормальное функционирование системы детекторов при выходе из строя одного из ФЭУ, т.е. повышает надежность всего изделия. Расположены ФЭУ симметрично относительно центральной оси изделия, максимально близко друг к другу, так чтобы входные

окна были направлены непосредственно на биореактор.

Стоит отметить, что наличие четырех ФЭУ связано исключительно с повышением надежности системы детекторов (за счет дублирования элементов). Резервирующий блок детекторов представляет собой два независимых ФЭУ.

ШУМОВЫЕ ОТСЧЕТЫ

Ключевым моментом, определяющим возможность разрабатываемой системы детекторов сверхслабого излучения достоверно регистрировать генерируемые микроорганизмами электромагнитные колебания, является интенсивность потока оптических фотонов, достигающих входного окна ФЭУ. Считается, что для корректных измерений величина регистрируемого сигнала должна быть как минимум равна среднему значению шума. В случае ФЭУ, работающего в режиме счета фотонов, оба вышеуказанных параметра логично описывать количеством импульсов тока в единицу времени.

Частота шумовых отсчетов ФЭУ может меняться в широких пределах в зависимости от внешних условий. Следует отметить, что значение уровня темновых шумов, указанное в паспорте на ФЭУ, не определяет реальное количество шумовых импульсов. Это связано с тем, что в системе детекторов реализована схема селекции большей части темновых отсчетов, обусловленных термоэмиссией электронов с фотокатода и динодов, путем выставления соответствующего порога срабатывания дискриминатора. Кроме того, паспортное значение уровня шума является типичным для данной серии ФЭУ, тогда как в системе детекторов сверхслабого излучения использованы специально отобранные ФЭУ со значением темнового шума, в несколько раз меньшим типичного.

В связи с этим реальная частота шумовых отсчетов будет определяться процессами черенковского излучения и/или генерации сцинтилляций непосредственно в стеклянной колбе ФЭУ ввиду наличия радиационного фона. Так, на Земле существует естественный радиационный фон, преимущественно формируемый излучением рассеянными в природе радионуклидами, содержащимися в земной коре, приземном воздухе, почве, воде, растениях, в организмах животных и человека, и лишь около 15% приходится на космические частицы (электроны, нейтроны, мезоны и пр.) и высокоэнергетичные γ -кванты. Изготовленная система детекторов сверхслабого излучения продемонстрировала уровень шума порядка 30–50 импульсов в секунду.

Для исключения влияния эффекта взаимодействия оптических фотонов с ФЭУ (рис. 2) измере-

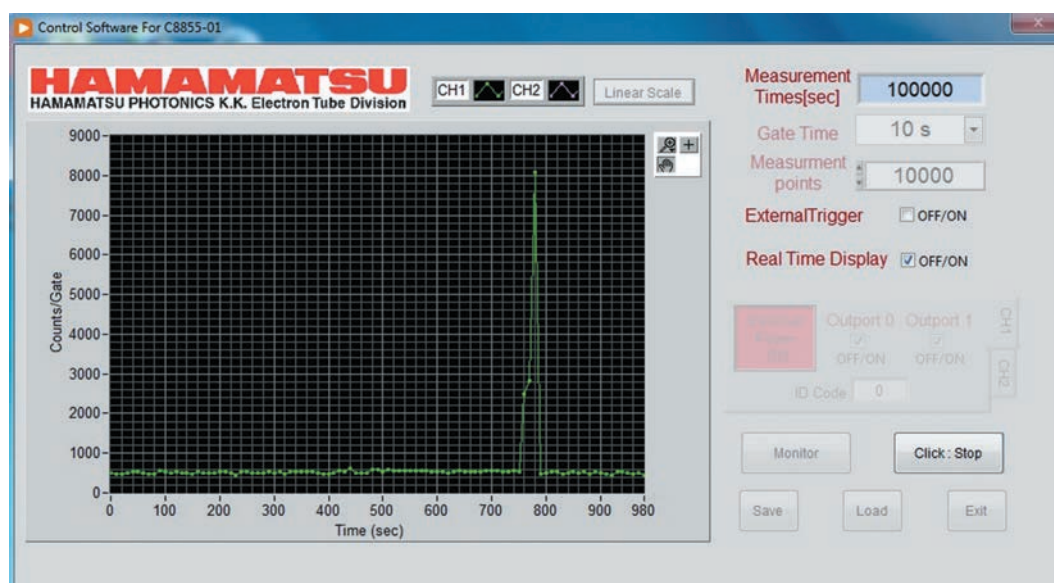


Рис. 2. Эффект взаимодействия оптических фотонов с ФЭУ, регистрируемый программным обеспечением блока счета фотонов Hamamatsu C8855-01.

ния проводились в затемненном помещении без источников света с использованием светонепроницаемых чехлов. При измерениях использовался ФЭУ без сцинтиллятора, также к лицевой стороне ФЭУ был приложен лист черной бумаги. Подача высокого напряжения выполнена по схеме заземленного катода.

Стандартное подключение фотокатода осуществляется на отрицательном потенциале, что приводит к некоторым сложностям при включении четырех ФЭУ, так как требуется изоляция каждого канала друг от друга. Во избежание указанной проблемы мы выбрали схему с заземленным фотокатодом, когда все фотокатоды находятся под одним потенциалом. Для изучения шумовых свойств схемы и работы ФЭУ в этом режиме был создан прототип, с помощью которого выполнены измерения шумовых характеристик и возможного взаимодействия космических мюонов с входным окном ФЭУ. Мы использовали ФЭУ Hamamatsu R1847-06 и осциллограф LeCroy WaveJet 314, 100 МГц – 1 Гигасэмпл/с.

Осциллограмма собственного шума детектора представлена на рис. 3. Уровень собственного шума детектора составляет 400 мкВ при загрузке ≈ 173 кГц.

На рис. 4 приведена осциллограмма одноэлектронного импульса, амплитуда которого составляет ≈ 2 мВ при загрузке от 940 мГц до 2.45 Гц.

На рис. 5 представлена осциллограмма двухэлектронного импульса с амплитудой ≈ 6 мВ при загрузке ≈ 1 Гц.

Осциллограмма трехэлектронного импульса представлена на рис. 6, его амплитуда изменяется в диапазоне 6–10 мВ при загрузке < 1 Гц.

На рис. 7 представлена осциллограмма импульса от космического излучения с амплитудой от 9 до 10 мВ при загрузке < 1 Гц.

ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМЫ АНТИСОВПАДЕНИЙ

Схема антисовпадений предназначена для проведения корректировки измерений низкоинтенсивного оптического сигнала от изучаемого объекта. Временная диаграмма работы схемы антисовпадений для разных случаев представлена на рис. 8. Выходной сигнал схемы антисовпадений повторяет последовательность ТТЛ-импульсов от блока детекторов оптического излучения, кроме тех моментов времени, когда от блока детекторов оптического излучения приходит логическая “1”. В этом случае сигнал на выходе схемы антисовпадений будет соответствовать логическому “0”. Укороченные импульсы учитываются системой подсчета, если их длительность ≥ 10 нс.

В описываемой системе схема совпадений реализована на микросхеме HCPL0600, которая представляет собой AlGaAs-светодиод, оптически соединенный с высокоскоростным логическим вентилем интегрированного фотодетектора со стробируемым выходом. Таким образом достигается оптическая изоляция логических информационных сигналов для регистрации и записи во внешние устройства. К достоинствам данной микросхемы можно отнести наличие внутренне-



Рис. 3. Осциллограмма собственного шума детектора.



Рис. 4. Осциллограмма одноэлектронного импульса.

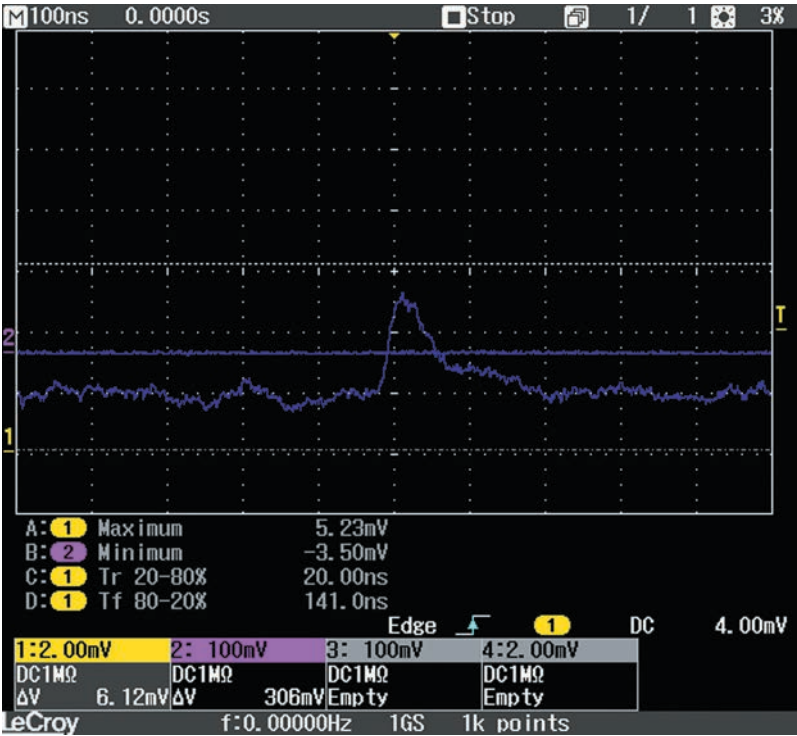


Рис. 5. Осциллограмма двухэлектронного импульса.



Рис. 6. Осциллограмма трехэлектронного импульса.



Рис. 7. Осциллограмма импульса от космического излучения.

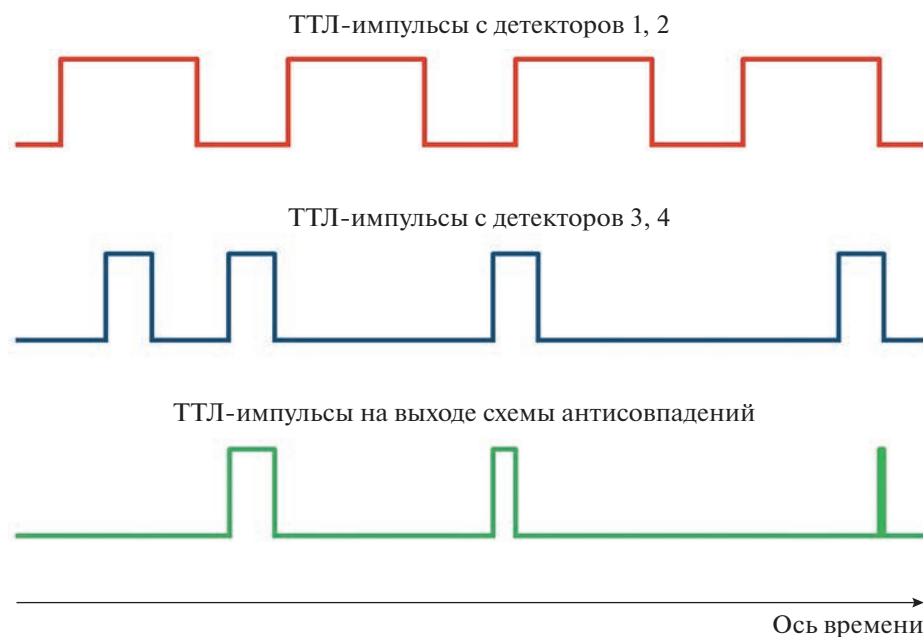


Рис. 8. Временная диаграмма сигналов для схемы антисовпадений.

го шумозащитного экрана, обеспечивающего подавление синфазных помех. Питание ФЭУ одноэлектронных детекторов оптических фотонов обеспечивают два регулируемых высоковольтных преобразователя C10 (Emco High Voltage), распо-

ложенные каждый на своей печатной плате. Один из них выдает напряжение для блока одноэлектронных детекторов оптических фотонов, другой — для резервного блока детекторов. Такая схема подключения позволяет независимо управлять



Рис. 9. Экспериментальный тестовый стенд на основе модуля счета фотонов и детектора оптического излучения.

режимами работы ФЭУ как одноэлектронных детекторов оптических фотонов, так и резервного блока. Снижение влияния шумовых импульсов обеспечивается уменьшением рабочего напряжения ФЭУ, понижением рабочей температуры, очищением ФЭУ и печатной платы.

Для решения задачи по снижению влияния шумовых импульсов была разработана печатная плата, работающая при пониженном напряжении. В качестве материала использовался фторопласт, который является более резистивным материалом, чем стеклотекстолит. Применена микросхема предусилителя с собственными входными

токами на уровне пикоампер. Наличие охлаждения способствовало уменьшению тепловых шумов. Высокочастотная электронная схема детектора способна регистрировать один фотоэлектрон, порождающий импульс в 2–3 нс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ БИОКУЛЬТУРЫ

Цель эксперимента заключалась в измерении частоты следования TTL-импульсов на выходе детектора, находящегося в полной темноте, и сравнении полученных данных с результатами измерения частоты импульсов, возникающих при митогенетическом свечении биокультур. Экспериментальный стенд, изображенный на рис. 9, включал в себя следующее оборудование: лабораторный источник питания, частотомер, осциллограф, нагревательную плиту, модуль счета фотонов и детекторную аппаратуру на основе ФЭУ.

Было проведено два эксперимента по измерению люминесценции нагретых образцов биокультур *Saccharomycetales boulardii*. Эксперименты показали хорошую воспроизводимость пиков эмиссий дрожжей и высокое отношение уровня сигнал/шум.

Так, собственный темновой сигнал ФЭУ был равен 300–350 импульсов за 10 с (рис. 10), в то время как сигнал от биокультуры – 18000–19000 импульсов за 10 с в период активного деления (рис. 11). Каждый одиночный дискрет графика представляет собой количество зарегистрированных фотонов за 10 с. По оси *X* отложено время в секундах, по оси *Y* – количество зарегистрированных фотонов/TTL-импульсов.

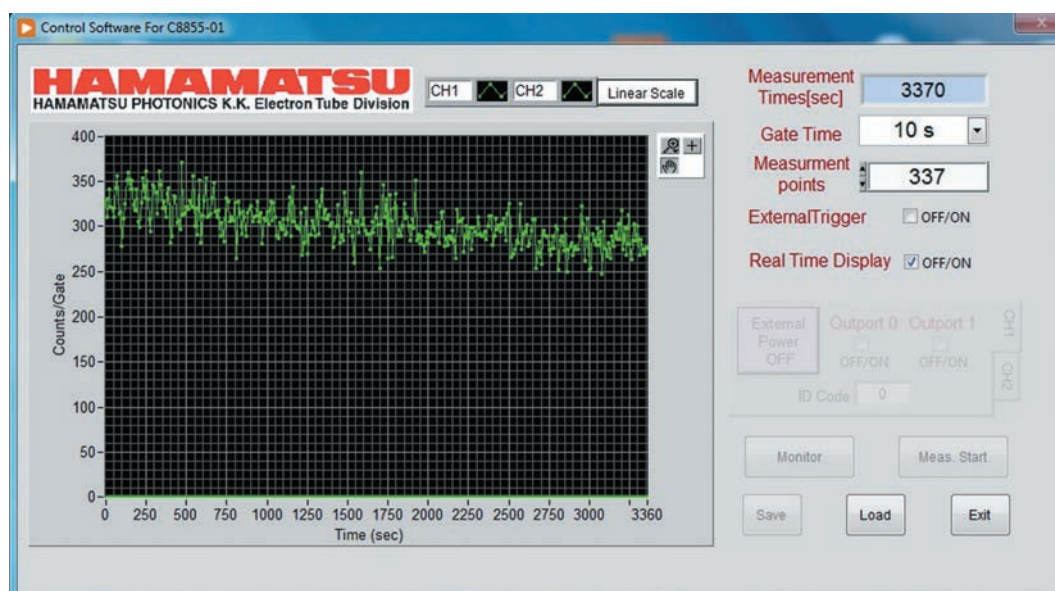


Рис. 10. Темновой ток фотокатода в детекторе оптического излучения.

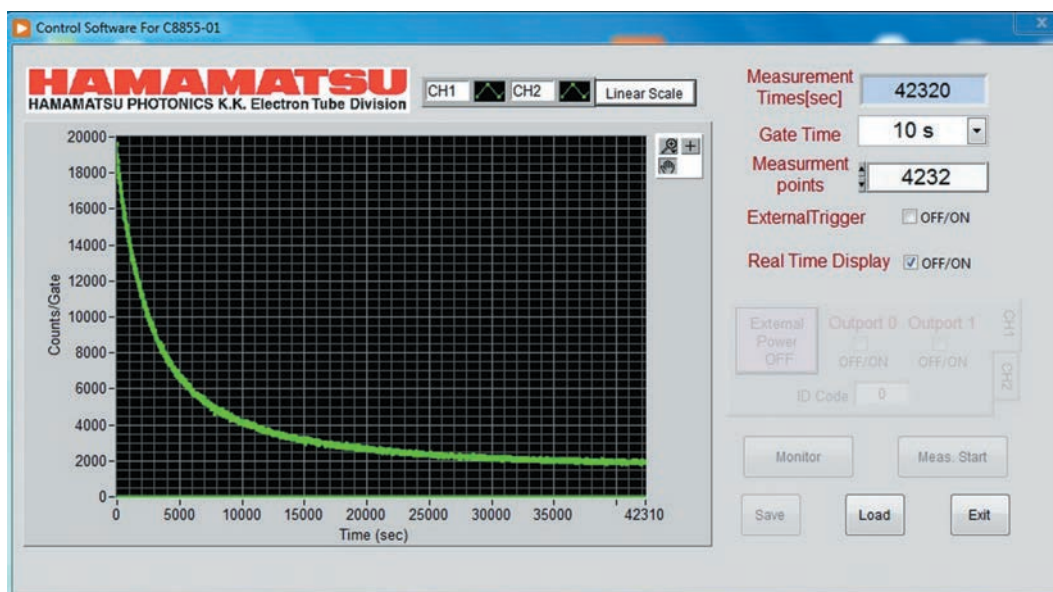


Рис. 11. Убывающее значение люминесценции предварительно нагретых до 35°C сахаромидет в течение 12 ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что используемый ФЭУ работает в однофотодиодном режиме. Разработанная для него электронная схема селекции однофотодиодных импульсов позволяет выделить фотодиодные импульсы и отделить их как от темновых импульсов, так и от оптических импульсов с большой амплитудой.

На сегодняшний день вакуумные ФЭУ являются предпочтительным датчиком для приложений с повышенными механическими нагрузками. Полупрозрачный фотокатод, размещенный внутри входного окна, по своей сути, ограничивает достижимую квантовую эффективность (~25% при 420 нм для типичных ФЭУ). Коэффициент усиления $\sim 10^6$ достигается за счет высокого (менее 1 кВ) напряжения смещения. ФЭУ, как правило, являются малошумными и конструктивно более жесткими (из-за использования вакуумных трубок), что способствует их применению в устройствах с повышенными механическими нагрузками. Снижение влияния магнитных полей обеспечивается применением магнитных экранов на основе пермалоя.

Типичная интенсивность оптического излучения составляет от 1 до 10 фотонов/с с 1 мм² поверхности объекта. При этом основная энергия излучения сосредоточена в коротких (длительностью меньше 0.01 с) квазипериодических всплесках с частотой от 5 до 20 всплесков/мин. Созданный модуль представляет собой оригинальное схемотехническое решение и позволяет исследовать широкий класс биомолекул. Дальнейший интерес представляет изучение влияния высоких

магнитных полей на сигнал ФЭУ [1–5], в том числе на сверхслабое оптическое излучение. Кроме того, высокоточная система регистрации интересна для изучения спектров комбинационного рассеяния.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность за финансовую поддержку Российскому фонду фундаментальных исследований, научный проект № 19-29-10007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rybakov A., Bagdinov A., Demikhov E., Kostrov E., Lysenko V., Piskunov N., Tsyachnykh Y. // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2016. V. 26. № 4. Article Number 4400403. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2517328>
2. Demikhov T., Kostrov E., Lysenko V., Demikhov E., Piskunov N. // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2012. V. 22. № 3. Article Number 9501004. <https://doi.org/10.1109/TASC.2011.2178994>
3. Demikhov E., Kostrov E., Lysenko V., Piskunov N., Troitskiy V. // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2010. V. 20. № 3. P. 612. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2041592>
4. Bagdinov A., Demikhov E., Kostrov E., Lysenko V., Piskunov N., Rybakov A., Tsyachnykh Y. // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2018. V. 28. № 3. Article Number 4400704. <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2784402>
5. Kostrov E., Demikhov E., Bagdinov A., Demikhov T., Lysenko V., Tsyachnykh Y. // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2016. V. 26. № 4. Article Number 0601305. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2522821>