

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.6>

УДК: 537.52; 621.387.333

## СИНХРОНИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРОГРАФА НА ОСНОВЕ ПЗС-МАТРИЦЫ И УСКОРИТЕЛЯ РАДАН

А.И. Липчак

Институт электрофизики УрО РАН  
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

Статья поступила в редакцию 10 марта 2026 г.

**Аннотация.** Представлены результаты разработки оборудования и экспериментальной методики для улучшения синхронизации спектрографа оптического диапазона на основе ПЗС-матрицы и импульсного сильноточного ускорителя типа РАДАН. Показана возможность получения спектральных данных с временным разрешением.

**Ключевые слова:** импульсное оптическое излучение, спектрограф, ПЗС-матрица.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 25-29-01381.

**Автор для переписки:** Липчак Александр Иванович, [lipchak@iep.uran.ru](mailto:lipchak@iep.uran.ru)

### Введение

В современных условиях развитие приборов для научных исследований является важной практической задачей [1]. Поэтому деятельность по их совершенствованию, в частности, по разработке оптического спектрального оборудования, является актуальной. Комплексы для измерения оптических спектров широко используются при изучении поглощения или испускания электромагнитного излучения [2], например, для исследования импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) [3,4]. Также спектральные методы широко

применяются при исследовании плазмы, так как в этом случае можно получить широкий спектр характеристик, описывающих такой объект [5,6]. В свою очередь, такая плазма во многом определяет характеристики устройств, в которых она используется, например, газоразрядных коммутаторах [7], являющихся важным элементом сильноточной импульсной электроники [8]. Обычно в современных спектрографах для регистрации оптической информации (спектра) применяется линейная ПЗС-матрица [9]. Как правило, спектрографы, работающие с внешней синхронизацией, используют, так называемый, «режим с пометкой кадра», т.е., регистрация осуществляется непрерывно, кадр за кадром с заданным временем накопления. Для обработки передается (в компьютер) кадр, в пределах которого поступает управляющий, т. н., триггерный импульс. Следует отметить, что спектральные данные регистрируются с экспозицией от долей до десятков, и даже сотен миллисекунд. Следовательно, такая методика измерений является удовлетворительной, когда исследуемый процесс относительно медленно изменяется по интенсивности и/или спектральному составу [2]. С другой стороны, для точной синхронизации кадровых процессов используются довольно сложные методики, т.е. для формирования кадра требуются, так называемые, пилотные предварительные импульсы [10]. Этот подход не всегда может быть применен к коротким по длительности и/или одноимпульсным (неповторяющимся) процессам, например, для импульсного оптического излучения, как в случае ИКЛ или излучения нестационарной плазмы, сформированной в высоковольтном газовом разряднике. Очевидно, что методика синхронизации с пометкой кадров не позволяет получить стабильные и воспроизводимые результаты, поскольку начало импульсного излучения и связанного с ним импульса синхронизации, имеет разброс в пределах регистрируемого кадра. Этот эффект может быть частично минимизирован путем накопления и усреднения информации [3], но такой подход не устраняет эту проблему полностью. Основной целью представленной работы является развитие экспериментальной методики и реализующей ее аппаратной части для улучшения синхронизации возбуждающего воздействия на исследуемый объект

(например, импульсного электронного пучка, разряда высоковольтного коммутатора или импульсного лазерного излучения), с одной стороны, и цикла регистрации, сбора спектральных данных с помощью ПЗС-матрицы, с другой. Данная работа была выполнена в рамках исследований плазмы высоковольтного газового коммутатора импульсного генератора типа РАДАНА с лазерным запуском [11, 12].

## 1. Описание экспериментальной установки

В данной работе для регистрации спектральной информации использовалась линейная ПЗС-матрица TCD1304AP. Для формирования рабочего цикла ПЗС-матрицы была использована плата управления на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) Cyclone EP1C3T100C8N. Для управления ПЛИС и передачи данных использовался параллельный интерфейс двунаправленной передачи данных на основе микросхемы FT245. Для управления этим модулем было специально доработано программное обеспечение [13].

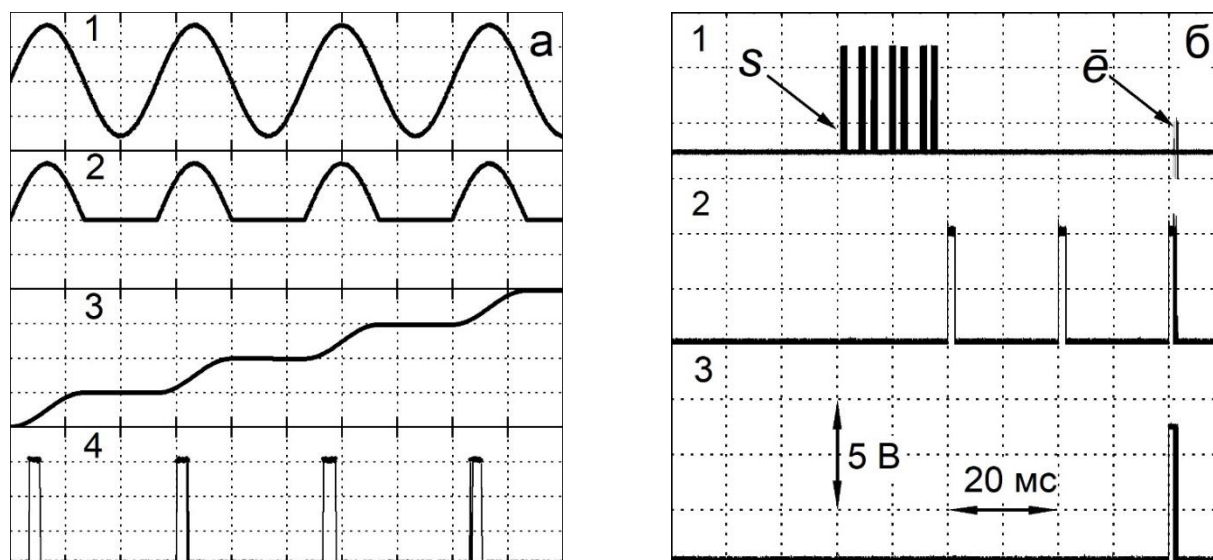


Рис. 1. Формирование синхронизирующих импульсов:

- а) первичный накопитель: 1 – напряжение питания 220 В, 50 Гц, 2 – выпрямленное напряжение, 3 – напряжение заряда первичного накопителя (срабатывание разрядника не показано), 4 – импульсы синхронизации;
- б) наложение 16 осциллограмм: 1 – импульс запуска заряда первичного накопителя ( $s$ ), 2 – три синхронизирующих импульса, 3 – импульс запуска системы регистрации.

При разработке аппаратной части модуля синхронизации также учтены особенности синхронизации устаревших, но вместе с тем, удовлетворительно функционирующих спектрографов [2]. Им будет уделено отдельное внимание ниже.

ПЗС-матрица могла работать как в стандартном режиме с покадровой записью с синхронизацией от внутреннего тактового генератора, так и с использованием внешней синхронизации с использованием TTL-сигнала основного накопителя генератора RADAN – Expert [14], который в данной работе использовался в качестве основной системы возбуждения. Осциллограммы, поясняющие функционирование этого накопителя показаны на рис. 1а. Обычно напряжение срабатывания достигается за 3 или 4 периода напряжения питания 220 В, 50 Гц (осциллограмма 2, рис. 1 а). Когда выпрямленное напряжение (осциллограмма 3, рис. 1а) достигает определенного, близкого к максимуму уровня, то формируется синхронизирующий импульс (осциллограмма 4, рис. 1а), связанные с моментом, когда достигается напряжение срабатывания разрядника первичного накопителя этого высоковольтного генератора. Наложение 16 сигналов, полученных при работе данной схемы показано на рис. 1б. Первый канал осциллографа регистрирует сигнал, который запускает цикл зарядки конденсаторов накопителя (старт-импульс отмечен символом S). Второй канал регистрирует формирование сигналов синхронизации. Отметка о формировании электронного пучка (символ  $\bar{e}$ ) также видна на первом канале осциллографа. Разброс между старт-импульсом и отметкой формирования электронного пучка составлял около 20 мс. Вместе с тем видно, что электронный импульс привязан к генерируемым синхронизирующим импульсам (канал 2). Нестабильность в этом случае не превышает 1 микросекунды. Третий канал осциллографа, приведенный на рис. 1б показывает формирование импульса запуска системы регистрации на основе ПЗС-матрицы с помощью модуля синхронизации, описанного ниже.

Как уже отмечалось, в зависимости от настроек, первичный накопитель высоковольтного генератора RADAN может генерировать 3 или 4

синхронизирующих импульсов до момента формирования электронного пучка. Поскольку последний синхроимпульс в этой последовательности непосредственно предшествует импульсу электронного пучка, то он имеет минимальный разброс относительно этого импульса. Поэтому именно последний синхроимпульс следует использовать для запуска цикла регистрации ПЗС-матрицы. В дополнение к вышеуказанному требованию необходимо, чтобы блок синхронизации стабильно работал в условиях достаточно высоких уровней электромагнитных помех, возникающих при эксплуатации такого оборудования, и минимизировал вероятность случайного срабатывания. Для решения этой задачи был разработан модуль синхронизации, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.

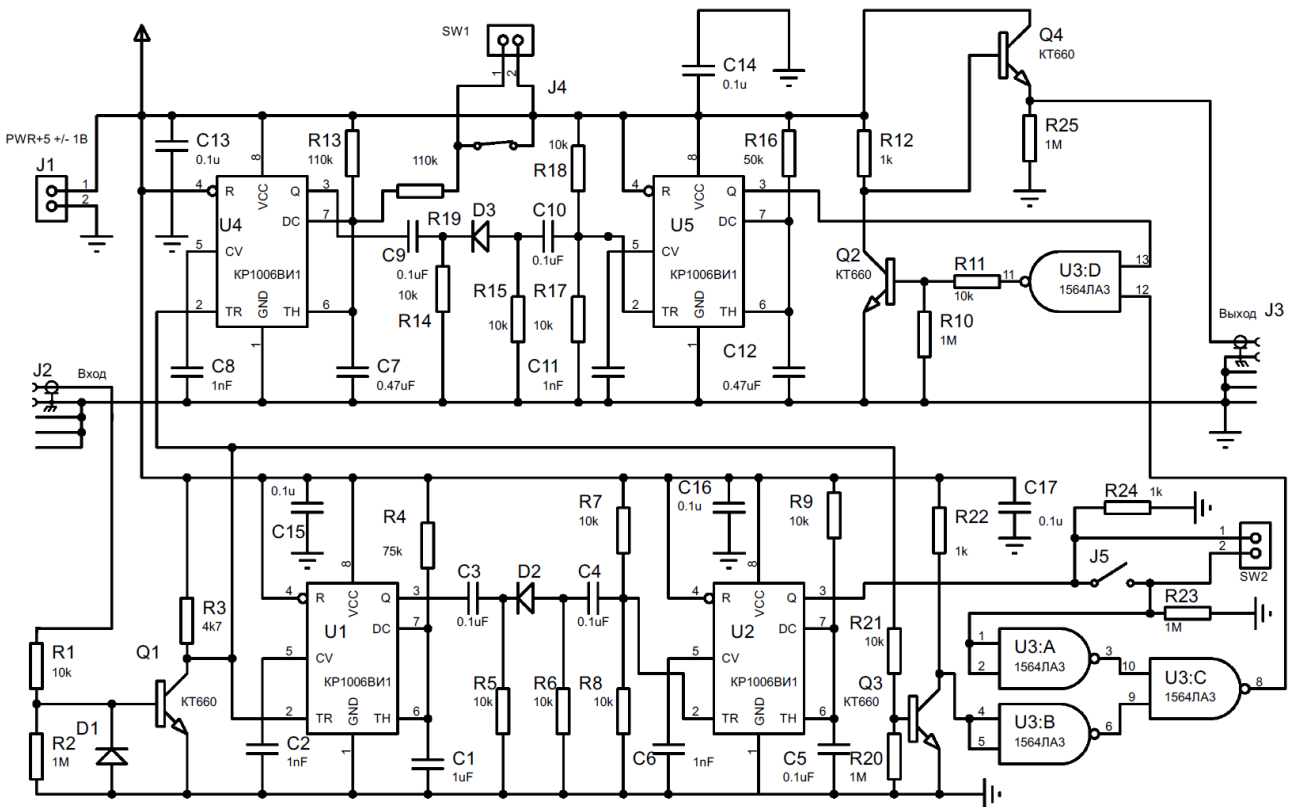


Рис. 2. Принципиальная схема модуля синхронизации.

В качестве базового элемента была выбрана схема релаксационного генератора с использованием интегрального таймера КР1006ВИ1 [15]. Общая логика работы этого модуля состоит в том, что с помощью последовательной работы нескольких генераторов сформировать ограниченные интервалы,

в пределах которых разрешен прием и обработка входящих импульсов. Некорректные, в смысле временных интервалов, импульсы должны игнорироваться, и в случае их пропуска, цикл регистрации ПЗС не должен формироваться. Модуль должен обеспечивать как работу от трех, так и от четырех синхроимпульсов (по настройке).

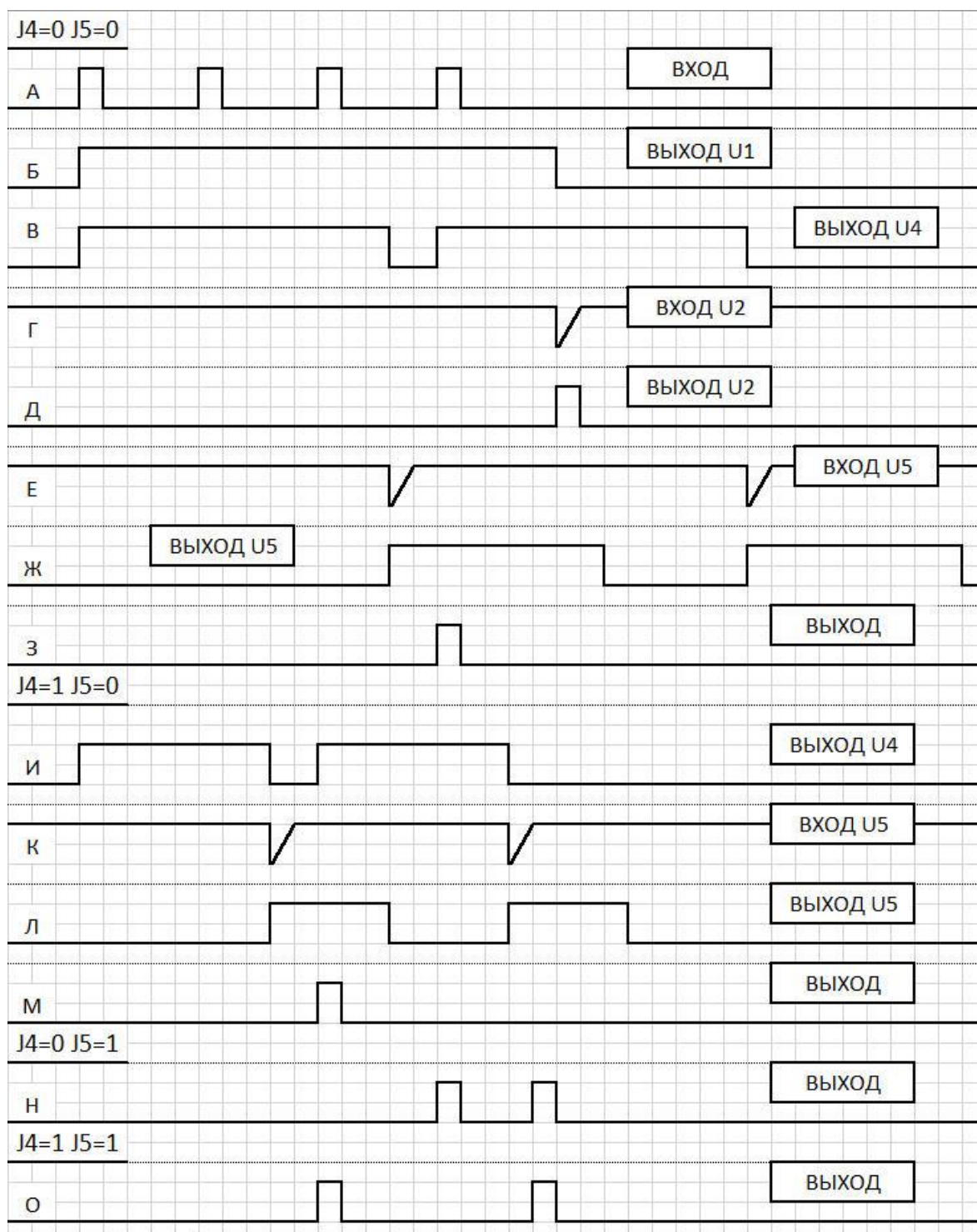


Рис. 3. Эпюры напряжений, иллюстрирующие работу схемы синхронизации. Одна клетка по горизонтали – 4 мс, по вертикали – 2.5 В.

На данный модуль накладывалось еще одно дополнительное требование, связанное с особенностью функционирования ПЗС-спектрографов предыдущего поколения. Эти требования также учтены при разработке данного модуля, и поясняются ниже.

На рис. 3 представлены эюры, иллюстрирующие функционирование модуля синхронизации. Импульсы синхронизации рис. 3, (а) инвертируются входным транзистором Q1 (здесь и далее обозначения элементов модуля даны по рис. 2). После этого импульсы поступают на входы таймеров U1 и U4, которые формируют по фронту «высокий – низкий» (ВН-фронт) импульсы заданной длительности – рис. 3, (б, в, и). В зависимости от положения ключа J4 (0 – разомкнут, 1 – замкнут) таймер U4 формирует импульс длительностью 52 мс рис. 3, (б) или 32 мс рис. 3, (и). Дифференцирующая цепь: C9, R14, D3, R15, C10, R17, R18 формирует импульс для запуска одновибратора U5 по ВН-фронту рис. 3, (е, к). Одновибратор U5, в свою очередь, формирует импульс заданной длительности ( $4 \div 5$  мс) рис. 3, (ж, л) в заданный момент времени в зависимости от положения ключа J4. Таким образом, на выходе таймера формируется «разрешающий» сигнал, перекрывающий либо третий, либо четвертый входной синхроимпульс. Далее с помощью стандартной бинарной логики (элементы U3: А, С, D, 2И–НЕ) эти импульсы мультиплицируются с входящими синхроимпульсами. Таким образом формируется импульс, который синхронизирован с четвертым или третьим входным импульсом, в зависимости от положения ключа J4 рис. 3, (з, м).

В спектрографах предыдущего поколения [2] контроллеры, обслуживающие цикл регистрации и передачи данных, требуют для перевода их в режим ожидания или окончания цикла регистрации дополнительный, второй импульс синхронизации. Эта особенность потребовала формирования таймерами U1, U2 дополнительного, второго импульса. Логика формирования этого импульса аналогична описанной выше, для U4, U5 с разницей только в величинах временных интервалов. Полученный импульс логически объединяется (элементы U3: В, С, D, 2И–НЕ) с сформированным синхроимпульсом, рис. 3, (н, о) или его

формирование игнорируется рис. 3, (з, м), если модуль синхронизации используется в связке с новыми спектрографами в зависимости от положения ключа J5.

## 2. Результаты тестирования и их обсуждение

Для тестирования модуля был собран экспериментальный стенд, структурная схема которого приведена на рис. 4. Тактовый генератор с частотой 1 – 10 Гц рис. 4, 1 запускал цикл зарядки первичного накопителя рис. 4, 2. Первичный накопитель генерировал последовательность из 3 или 4 импульсов (в зависимости от настройки и конструкции), которые преобразовывались модулем синхронизации для управления циклом регистрации ПЗС сигналы регистрировались осциллографом с полосой пропускания 500 МГц.

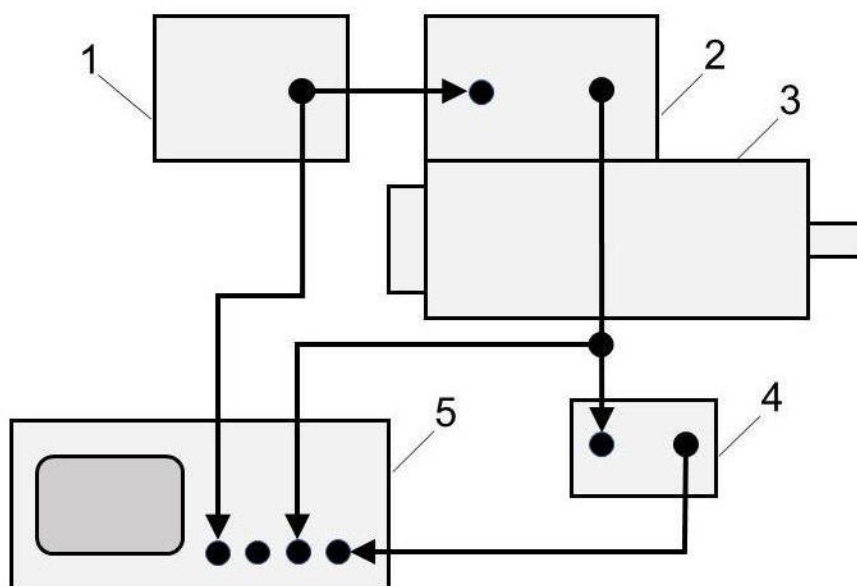


Рис. 4. Блок-схема экспериментального стенда: 1 – тактовый (задающий) генератор TTL-сигналов с частотой 1 ÷ 10 Гц, 2 – первичный накопитель генератора RADAN, 3 – генератор импульсов RADAN, 4 – модуль синхронизации, 5 – осциллограф.

Результаты тестирования модуля показаны на рис. 5. На вход модуля с частотой 1 Гц подавались пакеты из  $N = 3 \div 4$  импульсов с частотой импульсов внутри пакета  $f = 50$  Гц (импульсы синхронизации с первичного накопителя), рис. 5, а-з.

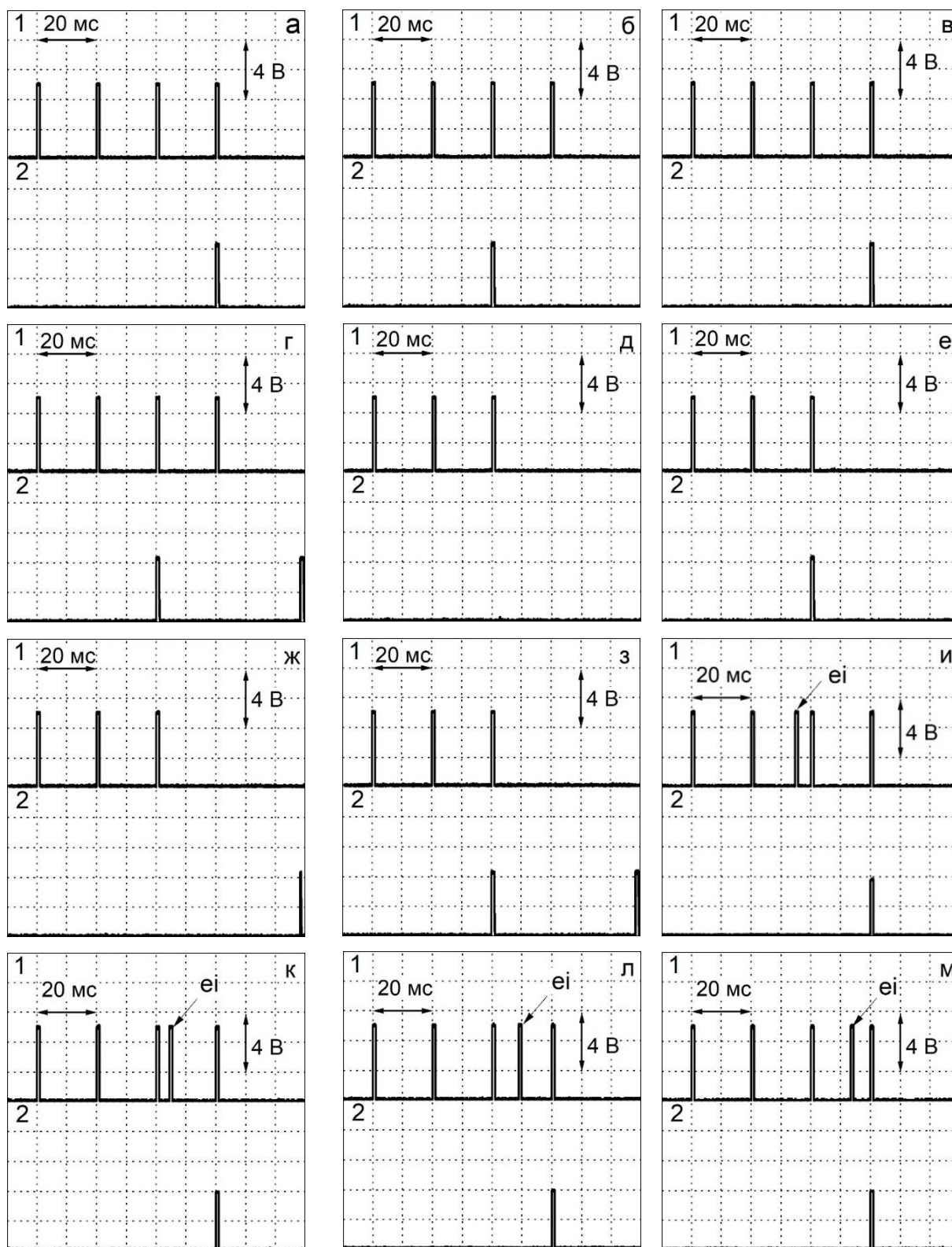


Рис. 5. Осциллограммы тестирования модуля синхронизации (1) – вход, (2) – выход, частота импульсов в пакете 50 Гц: а)  $N = 4, J_4 = 0, J_5 = 0$ ; б)  $N = 4, J_4 = 1, J_5 = 0$ ; в)  $N = 4, J_4 = 0, J_5 = 1$ ; г)  $N = 4, J_4 = 1, J_5 = 1$ ; д)  $N = 3, J_4 = 0, J_5 = 0$ ; е)  $N = 3, J_4 = 1, J_5 = 0$ ; ж)  $N = 3, J_4 = 0, J_5 = 1$ ; з)  $N = 4, J_4 = 1, J_5 = 1$ ; и); к); л); м).

На рис. 1а показано формирование импульса синхронизации по четырем входным импульсам и при настройке модуля на срабатывание по четвертому импульсу (ключ  $J4=0$  – разомкнут). На рис. 1б показано формирование импульса синхронизации по трем входным импульсам и при настройке модуля на срабатывание по третьему импульсу (ключ  $J4 = 1$ ). Видно, что четвертый импульс в этом случае игнорируется. На рис. 1в,г показано аналогичное формирование импульсов с дополнительным, вторым импульсом (ключ  $J5 = 1$ ).

На рис. 5д демонстрируется работа модуля при подаче на вход трех импульсов при  $J4 = 0$  (работа по четырем импульсам). Видно, что выходной сигнал не сформирован. На рис. 5е показана работа модуля при подаче на вход трех импульсов при  $J4 = 0$  (работа по трем импульсам). Видно, выходной импульс корректно сформирован. На рис. 5ж,з демонстрируется аналогичная работа с дополнительным вторым импульсом,  $J5 = 1$  (для спектрографов предыдущего поколения). Далее тестировалась работа модуля при возникновении во входном сигнале случайных помех, рис. 5и-м, в режиме для четырех импульсов. Аналогичные результаты были получены и для режима синхронизации по трем импульсам. Случайный сигнал был сформирован с помощью генератора SUIN TGF 3912A. «Помеха» на рис. 5и-м обозначена символами «ei». Видно, что «помеха» корректно обрабатывается схемой. В выборке из 256 импульсов со случайным сигналом не обнаружено некорректных срабатываний.

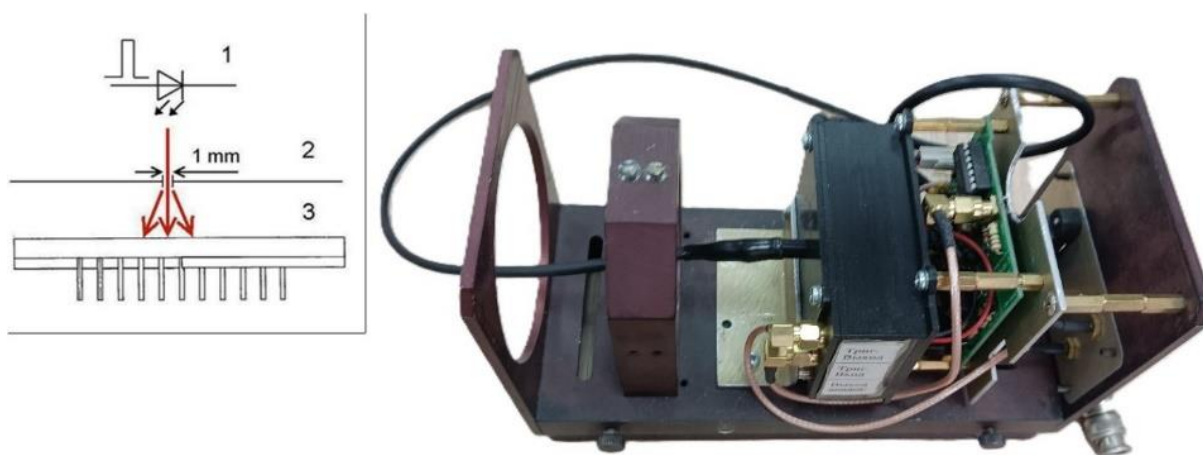


Рис. 6. Оптический узел. Внешний защитный кожух снят. На врезке – схема тестирования: 1 – светодиод, 2 – диафрагма, 3 – ПЗС-матрица.

Для проверки работы ПЗС в связке с модулем синхронизации был изготовлен специальный оптический узел, рис. 6, который, в частности, исключал попадание постороннего света на ПЗС-матрицу. Входное излучение подавалось на ПЗС-матрицу через диафрагму диаметром 1 мм, встроенную в этот оптический узел. Тем самым симулировался «спектр» на чувствительной зоне ПЗС, см., например, рис. 8а. Общая схема тестирования показана на врезке рис. 6. В качестве импульсного источника света с заданными временными характеристиками использовался светоизлучающий диод АЛ307, у которого длительность нарастания/спада излучения не превышала 50 микросекунд. Для подтверждения этого были выполнены отдельные измерения с использованием фотодиода UPD-50-UP-FR, с временем нарастания/спада не превышающим 50 пс. Результаты этих измерений представлены на рис. 7а. Измерения проводились при нагрузке в выходном тракте 150 кОм, при этом емкость соединительного кабеля, использованного при измерении, составляла 0.2 нФ, т.е., характерное время измерительного тракта составляло значение порядка 300 нс, что значительно меньше полученного значения длительности фронта нарастания/спада оптического сигнала, см. рис. 7а (осциллограмма 2).

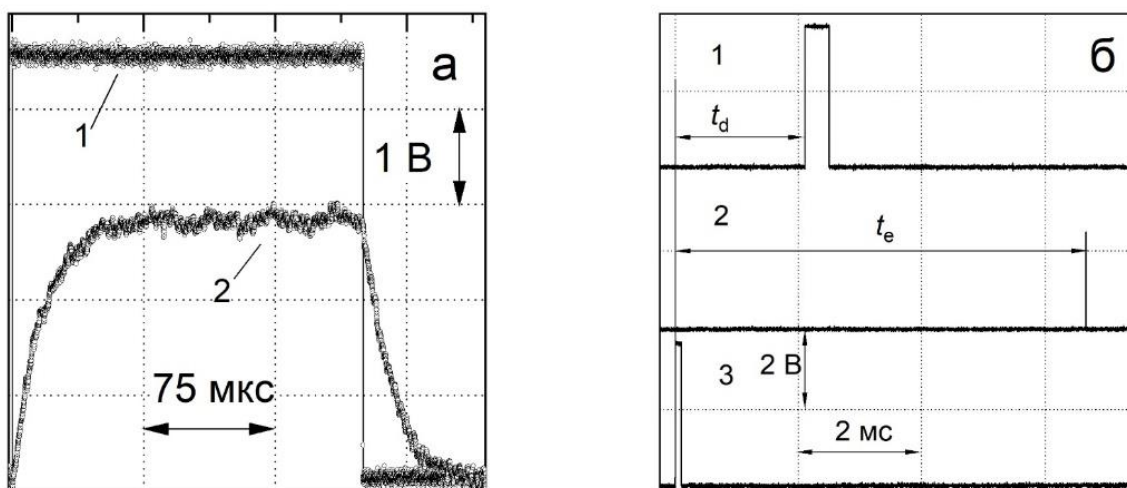


Рис. 7. а) Осциллограммы импульс питания светодиода – 1 и импульс излучения светодиода – 2; б) Сканирование импульса экспозиции импульс питания светодиода – 1, импульса окончания экспозиции – 2, импульс запуска экспозиции – 3.

Поскольку типичное время экспозиции ПЗС-матрицы составляет единицы или даже десятки миллисекунд, то использование такого тестового импульсного источника света в данном случае вполне допустимо. Для проверки корректности синхронизации использовался импульс питания светодиода длительностью 400 мкс, см. рис. 7б, осциллограмма 1. Для тестирования было выбрано минимально возможное время экспозиции (кадр)  $t_e = 6.6$  мс для данной ПЗС-матрицы. Пример такого измерения, когда импульс излучения светодиода полностью укладывается во интервал экспозиции  $t_e$  ПЗС-матрицы, показан на рис. 8а. Задерживая импульс напряжения питания светодиода на определенное время  $t_d$  и, следовательно, импульс излучения светодиода, можно просканировать интервал экспозиции  $t_e$ , что, в принципе, эквивалентно стробированию кадром регистрации импульса оптического излучения. Пример результата сбора данных с помощью ПЗС-матрицы при изменении  $t_d$  показан на рис. 8б. Полученные данные, по существу, подобны результату представленному на рис. 7а, и подтверждают корректность работы модуля синхронизации.

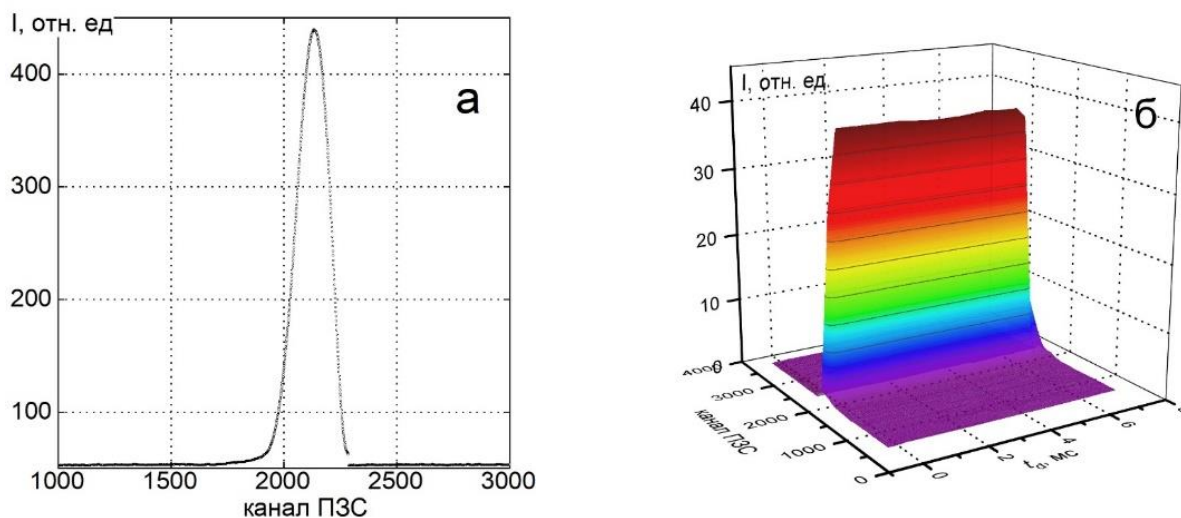


Рис. 8. а) Регистрация импульса светодиода; б) регистрация импульса светодиода с временным разрешением.

## Заключение

Разработана экспериментальная методика синхронизации цикла регистрации ПЗС и импульсного источника оптического излучения, а также создан аппаратно-программный комплекс, реализующий эту методику. При этом обеспечивается

разброс цикла регистрации синхронизации линейной ПЗС-матрицы не более 1 мс. Показано, что этот аппаратно-программный комплекс обеспечивает возможность получения спектральных данных с временным разрешением не хуже 6.6, мс

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 25-29-01381.

### Литература

1. Лущекина Е. В. Обновление приборной базы научных учреждений в ходе реализации 1 этапа национального проекта "наука и университеты". // Научное приборостроение. – 2024. – Т. 34. – № 3. – С. 106-116.
2. Силкис Е. Г. и др. Измеритель длины волны лазерных диодов в области 330–1080 нм. // Научное приборостроение. – 2020. – Т. 30. – № 1, – С. 27-38.
3. Solomonov V. I. et al. CLAVI pulsed cathodoluminescence spectroscope // Laser physics. – 2006. – V. 16. – No. 1. – P. 126-129. <https://doi.org/10.1134/S1054660X06010117>
4. Спирина А.В. и др. Трансформация фенола в твердом состоянии при воздействии импульсным электронным пучком // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.15>.
5. Лохте-Хольтгревен В. Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды. М.: Мир. 1971.
6. Буторин П. С. и др. Анализ прошедшего через плазму лазерного излучения как метод оценки внутренних параметров лазерной плазмы // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131. – № 12. С. 1688-1693. <https://doi.org/10.61011/OS.2023.12.57404.5493-23>
7. Lipchak A. I. et al. Application of Laser Radiation for Control of RADAN Compact Pulse Generator // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – V. 87. – No Suppl 2. – P. S222-S227. <https://doi.org/10.1134/S1062873823704646>

8. Shpak V. G. et. al. Investigations of compact high-current accelerators RADAN-303 synchronization with nanosecond accuracy // Digest of Technical Papers. Tenth IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, NM, USA. – 1995 – V.1 – P. 544-548, <https://doi.org/10.1109/PPC.1995.596684>.
9. Chan G. C. Y. Photon counting with intensified charge coupled device (ICCD)–I. In-depth detector characterization // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 2025. – V. 229. – Art. no. 107194. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2025.107194>
10. Yao J. L. et al. Design of integrated radar and communication system based on solvable chaotic signal // Scientific Reports. – 2024. – V. 14. – No. 1. – Art. no. 31663. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80956-4>
11. Липчак А. И., Барахвостов С. И. Исследование стабильности включения сильноточного импульсного ускорителя с оптическим управлением // ПТЭ. – 2021. – № 3. – С. 40 - 44. <https://doi.org/10.31857/S0032816221030216>
12. Липчак А. И. и др. Экспериментальный стенд для зондирования плазмы высоковольтного разрядника с лазерным управлением. // ПТЭ. – 2025. № 1. – С. 33 – 39. <https://doi.org/10.31857/S0032816225010054>
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613947 Российская Федерация. Стам : № 2017611314 заявл. 09.02.2017: опубл. (зарег.) 04.04.2017 / А. И. Липчак.; заявитель Институт электрофизики УрО РАН – С. 1.
14. Mesyats G. A. et al. RADAN-EXPERT portable high-current accelerator // Digest of Technical Papers. Tenth IEEE International Pulsed Power Conference. – IEEE, 1995. – V. 1. – P. 539-543. <https://doi.org/10.1109/PPC.1995.596681>.
15. Хоровиц П., Хилл У. Искусство электроники. – М: Мир, 1993. – Т. 2. – С. 371.

**Для цитирования:**

Липчак А.И. Синхронизация оптического спектрографа на основе ПЗС-матрицы и ускорителя РАДАН. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.4.6>