

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстров Ю. А., Ветров Н. З., Лисенков А. А. Плазмохимический синтез карбида титана на медных подложках // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 15. С. 33–39.
2. Кострин Д. К. Исследование возможности экспресс-контроля состава воды оптическим спектрометром при использовании разряда в жидкости // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 7. С. 15–19.
3. Кострин Д. К., Ухов А. А. Обнаружение и компенсация ложных спектральных линий в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой // Контроль. Диагностика. 2013. № 6. С. 26–28.
4. Vu T. N., Laukens K. Getting Your Peaks in Line: A Review of Alignment Methods for NMR Spectral Data // Metabolites. 2013. Vol. 3. P. 259–276.
5. Antoniadis A., Bigot J., Lambert-Lacroix S. Peaks detection and alignment for mass spectrometry data // J. de la Société Française de Statistique. 2010. Vol. 151, № 1. P. 17–37.
6. Кострин Д. К., Ухов А. А. Аппаратно-программный спектрометрический комплекс для исследования параметров светоизлучающих диодов // Биотехносфера. 2013. № 3. С. 21–25.
7. Повышение точности и воспроизводимости результатов колориметрических измерений светоизлучающих диодов / Р. В. Юдин, Д. К. Кострин, Д. И. Шишов, А. А. Ухов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 3. С. 8–13.
8. Кострин Д. К., Ухов А. А. Интерференция в поверхностном слое и метрологические параметры спектрометров с ПЗС-фотоприемниками // Датчики и системы. 2013. № 5. С. 13–15.
9. Brown A. J. Spectral Curve Fitting for Automatic Hyperspectral Data Analysis // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2006. Vol. 44, № 6. P. 1601–1608.
10. Коррекция спектральной характеристики оптического спектрометра при исследовании источников инфракрасного излучения / Д. К. Кострин, А. А. Ухов, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 2. С. 3–5.

D. K. Kostrin

Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

AUTOMATIC SEARCH OF SPECTRAL LINES POSITION IN THE ANALYSIS OF SPECTRUMS OF PLASMA RADIATION

The requirements for the search algorithms of spectral lines in the analysis of spectrums of plasma are considered. Results of work of two high-speed search methods by means of the test software are given. Possibility of application of the received results for the analysis of composition of plasma is shown in the control of technological processes.

Spectral line, optical spectrum, spectrometer, plasma radiation

УДК 681.785.5

А. А. Ухов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Влияние тактовых импульсов на уровень шумов ПЗС-фотоприемников

Рассмотрено влияние формирователей тактовых импульсов, выполненных на логических элементах, на шумовый выходной сигнал линейного фотоприемника. Показана возможность снижения уровня шумов путем ограничения спектральной полосы тактовых импульсов и предложен соответствующий схемотехнический способ реализации метода. Выявлена зависимость снижения уровня шумов от параметров элементов RC-фильтра.

Прибор с зарядовой связью, тактовые импульсы, оптический спектрометр, RC-фильтр

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) предназначены для преобразования пространственного распределения оптического излучения в электрический сигнал. Двухкоординатные ПЗС, обычно именуемые матрицами, используют в основном в фотоаппаратах и видеокамерах. Однокоординат-

ные ПЗС-линейки используются в сканерах, детекторах штрих-кодов, системах ориентации космических аппаратов, а также в оптических спектрометрах, используемых для анализа свойств веществ и параметров источников излучения [1]–[3].

ПЗС-фотоприемники являются твердотельными датчиками излучения, принцип работы которых основан на накоплении заряда в полупроводниковой структуре под действием фотонов света. Заряд, пропорциональный количеству поглощенных фотонов, накапливается в потенциальных ямах, формируемых под электродами накопления. После накопления отдельные зарядовые пакеты последовательно передаются на плавающий затвор выходного транзистора для дальнейшего преобразования в цифровой код. Транспортировка зарядовых пакетов осуществляется с помощью формирования циклических комбинаций тактовых импульсов на соответствующих электродах. В процессе накопления и транспортировки к зарядовым пакетам, образованным световыми фотонами, также добавляется некоторое количество шумовых зарядов, которые приводят к увеличению ошибок при преобразовании выходного сигнала ПЗС в цифровой код.

Собственные шумы ПЗС-фотоприемника включают в себя тепловые шумы в полупроводниковой структуре, шумы выходного усилителя, а также шумы, возникающие в процессе транспортировки зарядовых пакетов. В результате динамический диапазон фотоприемника, равный отношению максимального неискаженного сигнала к суммарному шуму, ограничен значением, зависящим от конструктивных особенностей ПЗС-фотоприемника. Для большинства «классических» однокоординатных ПЗС, имеющих на кристалле только светочувствительные элементы и управляющие электроды, этот параметр составляет от нескольких тысяч до десятков тысяч. Однако такие фотоприемники имеют довольно сложную схему управления и им на смену пришли приборы, имеющие непосредственно на кристалле все необходимые узлы для формирования управляющих сигналов. Расплатой за удобство использования стало существенное снижение динамического диапазона. Например, у популярного линейного ПЗС TCD1304 производства «Toshiba» этот параметр составляет всего 300, а у ILX511 производства «Sony» – 267. Несмотря на указанный недостаток, данные ПЗС-линейки широко используются в научных и производствен-

ных приборах [4], [5] для спектрального анализа, поскольку имеют приемлемые параметры при невысокой стоимости.

Снижение динамического диапазона в данных приборах по сравнению со специализированными дорогими ПЗС-линейками ведет к увеличению ошибок измерения, что особенно заметно в случае малой амплитуды сигнала [6] в определенных участках, ввиду снижения соотношения сигнал/шум. Применение программной коррекции формы сигнала возможно, но с определенными ограничениями, связанными с характером и формой спектров [7]. Повысить точность можно с помощью статистической обработки результатов многократных измерений путем усреднения нескольких кадров и применения цифровой фильтрации [8], однако данный подход реализовать не всегда возможно из-за ограниченного времени на однократное измерение для большинства практических приложений. Повышение динамического диапазона возможно также с помощью выравнивания спектральной характеристики ПЗС-фотоприемника [9], однако это влияет только на локальные зоны, а не на сигнал в целом.

Основная причина значительного увеличения уровня шумов, заключается в том, что рядом с аналоговыми элементами ПЗС находятся цифровые генераторы и преобразователи уровней управляющих сигналов (рис. 1). Генератор тактовых импульсов формирует необходимую последовательность цифровых сигналов для корректного функционирования прибора. Сигналы от генератора, выполненного на микроконтроллере либо программируемой логической матрице, как правило, подаются через буферные логические элементы, имеющие комплементарную структуру металл–оксид–полупроводник (КМОП).

Производителем ПЗС-линеек фирмой «Toshiba» рекомендуется подавать тактовые импульсы на ПЗС через логические элементы 74НС04. Выходные каскады логических элементов серии 74НС рассчитаны на переключение на частотах до 300 МГц. Тактовые импульсы, подаваемые от генератора, имеют относительно небольшую частоту 4 МГц, но при этом фронты импульсов на выходе буферных логических элементов имеют время нарастания 5...6 нс, что означает наличие в спектре сигнала гармоник с частотой значительно более 300 МГц. Столь высокочастотный сигнал свободно проникает через внутренние паразитные конденсаторы в элементы структуры ПЗС

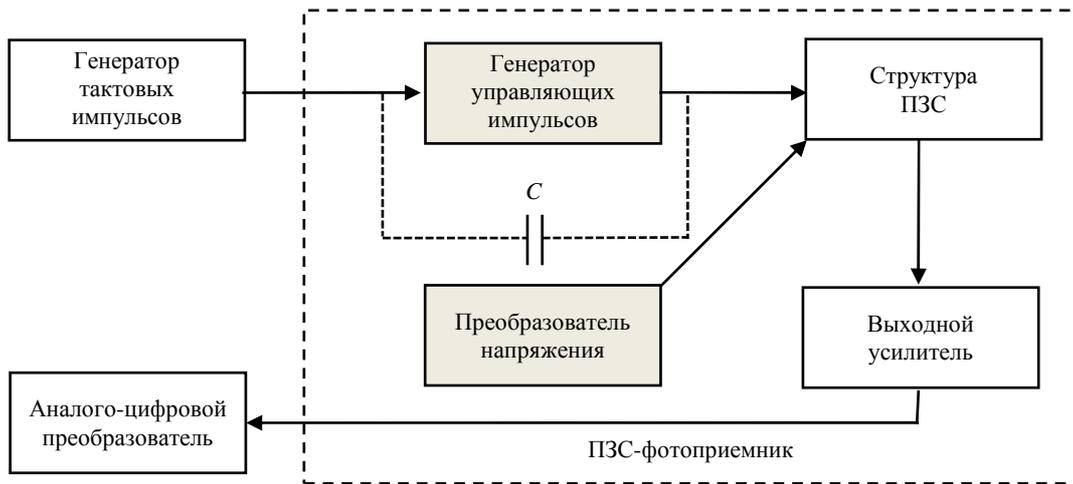


Рис. 1

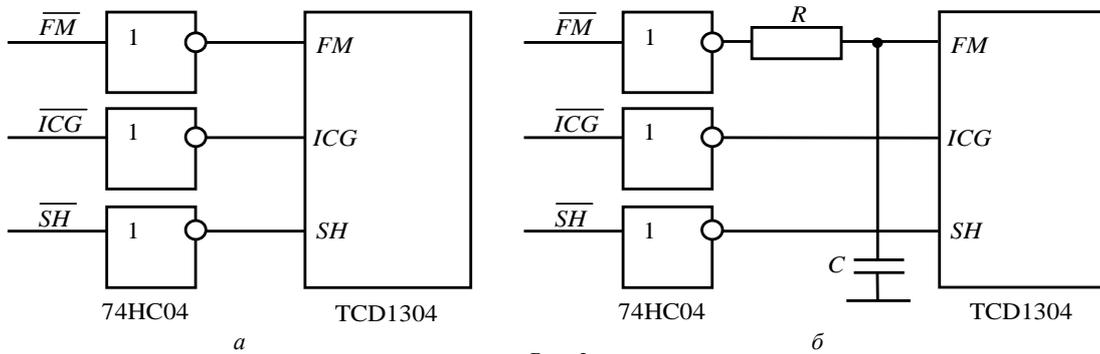


Рис. 2

(конденсатор C на рис. 1), создавая дополнительный шум, который и приводит к снижению динамического диапазона.

Проверить данное предположение можно, сравнив уровень шума выходного сигнала ПЗС-фотоприемника, тактируемого обычным КМОП логическим элементом со схемой тактирования, имеющей ограниченную полосу частот. Наиболее просто ограничения полосы частот сигнала тактирования можно добиться с помощью RC -фильтра. На рис. 2, *а* представлена схема подключения ПЗС TCD1304 с буферными логическими элементами, рекомендованная производителем, а на рис. 2, *б* – модифицированная схема с ограничением полосы частот фазного сигнала тактирования FM с помощью RC -фильтра. Тактовые импульсы FM имеют наибольшую частоту, и их влияние на шумы ПЗС будет более заметно по сравнению с другими тактовыми импульсами, сигналы которых не модифицируются. Собственная входная емкость вывода FM составляет 10 пФ и учитывается путем суммирования с емкостью внешнего конденсатора C фильтра.

Для проведения исследований был использован спектрометр ISM3600, разработанный на кафедре ЭПУ СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Данный спектрометр использует ПЗС-линейку TCD1304 в ка-

честве фотоприемника [10], а регистрация и анализ сигналов производится с помощью специализированного программного обеспечения (ПО) Aspect2010. В данном ПО имеются функции статистической обработки информации и, в частности, усреднение по нескольким спектрам (полным кадрам с ПЗС-линейки). На рис. 3 представлен фрагмент сигнала, включающего в себя результаты обработки 100 кадров: 1 – распределение интенсивности I максимумов, 3 – распределение минимумов и 2 – среднее по всем кадрам. На оси абсцисс отложена длина волны λ , при этом отрезку в 1 нм соответствует примерно 10 пикселей ПЗС, на оси ординат – уровень сигнала в процентах от максимального.

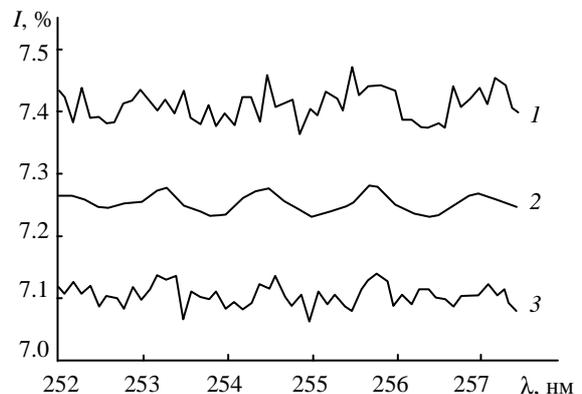


Рис. 3

Сигналы анализировались при односекундном времени накопления заряда в ПЗС. Из трех исходных распределений максимумов, минимумов и среднего значения по 100 кадрам вычислялась разность между максимумом и средним, а также между минимумом и средним в 10 точках, которые затем также усреднялись. На рис. 4 представлена зависимость полученного значения среднего уровня шума в процентах от максимального значения сигнала для фиксированного времени накопления и различных номиналах конденсатора RC-фильтра.

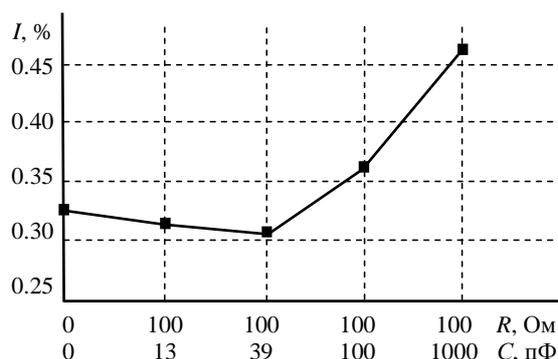


Рис. 4

Как видно из приведенной зависимости, наблюдается явный минимум уровня шумов при номиналах элементов RC-фильтра 100 Ом и 39 пФ. Дальнейшее увеличение постоянной времени RC-цепочки приводит к значительному увеличению шумов. Частота среза для оптимального фильтра около 400 МГц, что соответствует искажению прямоугольного сигнала частотой 4 МГц не более 1 %. Дальнейшее увеличение постоянной времени и, соответственно, снижение частоты среза вызывают существенное искажение формы тактирующих импульсов. В результате возникает нарушение фазировки работы внутренних генераторов тактовых импульсов ПЗС и, как следствие, генерируются дополнительные шумы, связанные с нестабильностью работы всех внут-

ренних узлов фотоприемника. Исследование схемы с резистором меньшего номинала показал аналогичную, но значительно менее выраженную тенденцию (рис. 5).

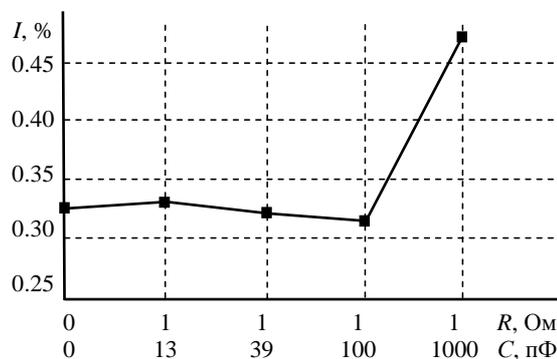


Рис. 5

Снижение номинала резистора в 100 раз требует увеличения номинала конденсатора также в 100 раз при той же частоте среза. Однако подобное снижение резистора приводит к увеличению токов перезаряда конденсатора, которые уже не могут быть обеспечены стандартным КМОП логическим элементом.

Таким образом, модификация стандартной схемы включения линейного ПЗС-фотоприемника с добавлением RC-фильтров, ограничивающих частотную полосу источников тактовых импульсов, позволяет заметно снизить уровень шумов регистрируемого сигнала. Ограничение полосы частот не должно приводить к искажению формы прямоугольных тактирующих импульсов более чем на 1 %. Данный способ снижения шумов можно рекомендовать для любых устройств, использующих недорогие ПЗС-линейки массовых серий, поскольку заметный эффект достигается без существенных затрат на усложнение схемы включения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колгин Е. А., Ухов А. А., Савушкин А. В. Спектрометры на основе полихроматора и одномерной ПЗС-матрицы: опыт разработки и применения // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2-3. С. 120-126.
2. Спектрометрическое устройство для идентификации пород древесины / Е. А. Колгин, А. А. Ухов, А. А. Воронин, А. А. Кострюков, В. С. Черноглазов, А. В. Савушкин // Петерб. журн. электроники. 2008. № 2-3. С. 116-119.
3. Модернизация приборов и методики спектральной идентификации пород древесины // А. А. Воронин,

- В. А. Герасимов, Д. К. Кострин, П. Е. Смирнов, А. В. Турбаров, А. А. Ухов // Биотехносфера. 2013. № 3. С. 16-20.
4. Кострин Д. К., Ухов А. А. Аппаратно-программный спектрометрический комплекс для исследования параметров светоизлучающих диодов // Биотехносфера. 2013. № 3. С. 21-25.
5. Оптико-электронная информационно-измерительная система контроля дезинфицирующих средств на основе полигексаметиленгуанидина / А. М. Василевский, Г. А. Коноплев, Д. А. Светлов, В. А. Герасимов, Д. К. Кострин, А. А. Ухов // Медицинская техника. 2014. № 1. С. 10-13.

6. Коррекция спектральной характеристики оптического спектрометра при исследовании источников инфракрасного излучения / Д. К. Кострин, А. А. Ухов, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 2. С. 3–5.

7. Кострин Д. К., Ухов А. А. Светосигнальная характеристика ПЗС-фотоприемника в области больших световых потоков // Контроль. Диагностика. 2013. № 5. С. 40–42.

8. Повышение точности и воспроизводимости результатов колориметрических измерений светоиз-

лучающих диодов / Р. В. Юдин, Д. К. Кострин, Д. И. Шишов, А. А. Ухов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 3. С. 8–13.

9. Кострин Д. К., Ухов А. А. Интерференция в поверхностном слое и метрологические параметры спектрометров с ПЗС-фотоприемниками // Датчики и системы. 2013. № 5. С. 13–15.

10. Ухов А. А., Кострин Д. К. Оптимизация системы регистрации многоканального оптического спектрометра // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 4. С. 8–12.

A. A. Uhov

Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

INFLUENCE OF THE CLOCK PULSES ON THE LEVEL OF CCD PHOTODETECTORS NOISE

Influence of the logical elements clock pulses on the linear photodetector output signal noise is considered. Possibility of the noise level decreasing by clock pulses spectral band limitation is shown and the appropriate schematic is offered. Dependence of the noise level decreasing by RC filter elements parameters adjustment is revealed.

Charge coupling device, clock pulses, optical spectrometer, RC filter