

ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.7

И.В. Фролов, О.А. Радаев, В.А. Сергеев

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PSoC¹

Фролов Илья Владимирович, кандидат технических наук, окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета. Старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. Имеет публикации в области методов и средств неразрушающего контроля полупроводниковых приборов. [e-mail: ilya-frolov88@mail.ru].

Радаев Олег Александрович, окончил радиотехнический факультет УлГТУ. Младший научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, аспирант УлГТУ. Имеет публикации в области разработки автоматизированных средств измерения параметров полупроводниковых приборов. [e-mail: oleg.radaev.91@mail.ru].

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, доцент, окончил физический факультет Горьковского государственного университета. Директор УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Имеет статьи и изобретения в области моделирования и исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Аннотация

Рассмотрены возможности и особенности автоматизации процессов измерения электрических характеристик полупроводниковых приборов (ППП) с использованием программируемой системы на кристалле PSoC 4 фирмы Cypress. Обсуждаются общие требования к аппаратной части современных измерителей характеристик ППП. Представлена структурная схема автоматизированного измерителя вольт-фарадных характеристик (ВФХ) полупроводниковых диодов, реализующего частотный метод измерения емкости. Измерительный блок, выполняющий функции обмена данными с компьютером, задания режима контролируемого объекта, измерения частоты колебаний LC автогенератора и обработки измерительной информации, реализован на программируемой системе на кристалле PSoC 4 фирмы Cypress.

Ключевые слова: автоматизация измерений, полупроводниковый прибор, вольт-фарадные характеристики, программируемая система на кристалле.

AUTOMATION OF MEASUREMENT PROCESSES OF SEMICONDUCTOR DEVICES ELECTRICAL CHARACTERISTICS WITH THE USE OF PSoC

Ilya Vladimirovich Frolov, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Senior Scientist at the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; an author of papers in the field of methods and means of nondestructive inspection for semiconductor devices. e-mail: ilya-frolov88@mail.ru.

1 Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-32-60051 мол_а_дк.

Oleg Aleksandrovich Radaev, graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk State Technical University; Senior Scientist at the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; Postgraduate Student at Ulyanovsk State Technical University; an author of papers in the field of development of semiconductor devices automated measurement tools. e-mail: oleg.radaev.91@mail.ru.

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Engineering, Associate Professor; graduated from the Faculty of Physics of Gorky State Technical University; Director of the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; an author of papers in the field of the modeling and researching semiconductor devices and integrated circuits parameters. e-mail: sva@ulstu.ru.

Abstract

The possibilities and features of automation of measurement processes of the semiconductor devices electrical characteristics with the use of a programmable system-on-chip PSoC 4 produced by Cypress are considered. The authors discuss the general requirements to the hardware of modern measurers of semiconductor devices characteristics. The block diagram of the automated measurer of capacitance-voltage characteristics of semiconductor diodes implementing the frequency method of capacitance measurement is presented. The measuring block performs the functions of data exchange with the computer, setting block for the mode of the controlled object, measuring oscillation frequency of LC oscillator and measurement information processing. The block is implemented on a programmable system-on-chip PSoC 4 produced by Cypress.

Key words: measurement automation, semiconductor device, capacitance-voltage characteristics, programmable system-on-chip.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация процессов измерений наряду с совершенствованием метрологических характеристик средств измерений является одним из ключевых направлений развития средств диагностики и контроля качества полупроводниковых приборов (ППП). Непрерывное усложнение технологий изготовления и повышение требований к надежности ППП вызывает необходимость повышения быстродействия, точности, разрешающей способности средств измерения. Современные автоматизированные измерительные приборы и установки, используемые для измерения характеристик ППП, как правило, проектируются на основе микроконтроллеров и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [1–4]. Однако относительно недавно стало развиваться направление приборостроения на основе программируемых систем на кристалле PSoC (Programmable System on Chip) фирмы Cypress [5, 6], обладающих рядом преимуществ по сравнению с микроконтроллерами.

В статье рассмотрены основные требования, предъявляемые к средствам измерения электрических характеристик ППП, и возможности их автоматизации с использованием системы на кристалле PSoC 4. В качестве примера представлен вариант автоматизированного измерителя вольт-фарадных характеристик (ВФХ) полупроводниковых диодов, реализующий частотный метод измерения емкости. Функциональная схема измерителя построена по принципу, использованному в автоматизированной установке для измерения ВФХ гетеропереходных светодиодов [3], при этом все измерительные блоки выполнены на PSoC 4.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ППП

Процедура измерения электрических характеристик (вольт-амперных, вольт-фарадных и т. п.) ППП и параметров их малосигнальной эквивалентной схемы (дифференциальное сопротивление, диффузионная емкость и др.) заключается в задании тока и напряжения в рабочей точке ($I_0; U_0$), подаче на ППП тестового переменного сигнала и измерении отклика ППП на тестовый сигнал [7]. Все ППП являются существенно нелинейными элементами, то есть их параметры зависят от уровня приложенного напряжения и (или) протекающего тока. Так эквивалентная емкость p - n -перехода зависит от напряжения как при прямом, так и при обратном смещении; дифференциальное сопротивление диода или входное сопротивление транзистора зависят от протекающего тока и т. д. Вследствие этого точность измерения параметров ППП зависит от уровня тестового сигнала [8, 9]. Для минимизации погрешности измерений, обусловленной нелинейностью параметров ППП, к амплитуде тестового сигнала измерителей параметров ППП предъявляют особые требования. Например, при измерении дифференциального сопротивления полупроводникового диода в соответствии с ГОСТ 18986.14–85 [10] амплитуда переменного тока диода не должна превышать 10% значения постоянного тока, а при измерении емкости диода в соответствии с требованиями ГОСТ 18986.4–73 [11] среднеквадратическое значение переменного напряжения на диоде не должно превышать величины $0,07(U_0 + \varphi_K)$, где φ_K – контактная разность потенциалов. Однако степень нелинейности характеристик некоторых современных ППП, например, гетеропереходных светодиодов с множественными квантовыми ямами, существенно выше нелинейности характе-

ристик ППП на основе $p-n$ -гомопереходов, которые удовлетворительно описываются стандартными моделями. В связи с этим ведущие производители аппаратуры для измерения параметров ППП стремятся снизить амплитуду тестового сигнала. Так, например, комплекс 4200-SCS фирмы Keithley [2] для измерения характеристик ППП позволяет устанавливать минимальное действующее значение тестового сигнала 10 мВ, а прецизионный измеритель RLC E4980A фирмы Agilent – 100 мкВ.

Другим важным фактором, влияющим на точность измерения параметров ППП, является их температурная зависимость. Распределенными источниками тепла внутри ППП являются подводящие проводники, контакты, внешние слои и активная область. При малых токах нагревом контактов и внешних слоев можно пренебречь из-за малой мощности, выделяемой на их паразитных сопротивлениях, и основным источником тепла будет активная область, нагрев которой происходит в результате рекомбинации носителей заряда. При повышении тока вклад паразитных сопротивлений и внешних слоев в повышение температуры ППП возрастает и может стать определяющим [7]. Следовательно, при измерении параметров ППП для исключения влияния саморазогрева под действием протекающего тока необходимо обеспечивать стабилизацию температуры ППП путем термостатирования либо проводить измерения в импульсном режиме с большой скважностью.

Важным требованием является возможность перестройки частоты тестового сигнала, поскольку частотные

зависимости параметров ППП могут проявляться в диапазоне частот до десятков МГц.

Таким образом, к средствам измерения электрических характеристик ППП предъявляются следующие требования: малая амплитуда тестового сигнала, широкий диапазон изменения рабочей точки по току и напряжению, возможность перестройки частоты тестового сигнала, возможность задания различной формы тестового сигнала (гармонический, импульсный и др.).

ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ППП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ PSoC 4 ФИРМЫ CYPRESS

Программируемая система на кристалле PSoC представляет собой систему, состоящую из аналоговых и цифровых блоков, размещенных в одной интегральной схеме, и имеющую возможность конфигурирования независимо от процессора [12]. Фирма Cypress производит четыре типа систем на кристалле, различающихся функциональными возможностями: PSoC 1, PSoC 3, PSoC 4 и PSoC 5/5LP. Система PSoC 4, блок-диаграмма которой приведена на рисунке 1, удобна для разработки средств измерения, поскольку имеет ряд важных измерительных блоков [13].

PSoC 4 построена на базе 32-разрядного ядра ARM Cortex-M0, имеющего возможность задания тактовой частоты до 48 МГц, и располагает объемом памяти до 32 kb flash, 4 kb SRAM и 4 kb ROM. PSoC 4 сочетает в себе программируемые и перестраиваемые цифровые и анало-

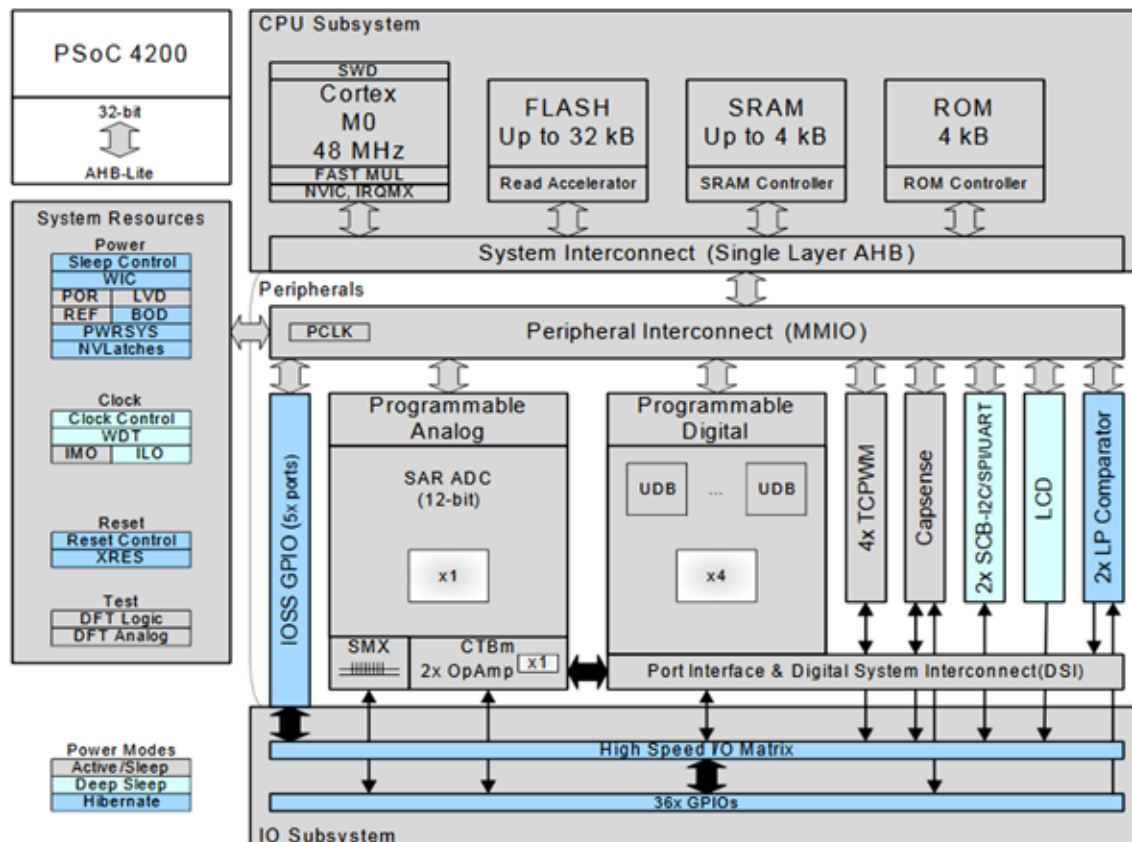


Рис. 1. Блок-диаграмма архитектуры PSoC 4 семейства 4200

говые блоки с возможностью гибкой автоматической конфигурации независимо от процессора. В состав PSoC семейства PSoC 4200 входят следующие аналоговые и цифровые блоки: два операционных усилителя (ОУ), имеющих, в том числе, возможность конфигурации в режиме компаратора и буферного каскада перед входом аналого-цифрового преобразователя (АЦП); один 12-разрядный АЦП последовательного приближения (SAR ADC); два токовых цифро-аналоговых преобразователя (ЦАП); два маломощных компаратора, работающих в режиме глубокого сна; четыре программируемых универсальных логических блока, которые предназначены для реализации синхронных конечных автоматов; четыре 16-разрядных широтно-импульсных модулятора (ШИМ). PSoC 4 семейства 4200 имеет 36 программируемых портов ввода/вывода (GPIOs) с возможностью их реконфигурации; коммуникационные интерфейсы I²C, SPI, UART. PSoC 4 имеет возможность подключения LCD-дисплея и емкостных датчиков. Диапазон напряжений питания составляет от 1,71 В до 5,5 В, что удобно при использовании в устройствах со стандартным питанием 3,3 В и 5 В. Программирование PSoC осуществляется в специализированной программной среде PSoC Creator, имеющей интуитивно понятный графический интерфейс.

Перечисленные функциональные возможности системы PSoC 4 позволяют использовать ее для построения автоматизированных средств измерения электрических характеристик ППП, поскольку они достаточны как для формирования тестового сигнала, требования к которому изложены выше, так и для измерения отклика ППП на тестовый сигнал и обработки измерительной информации. Такие преимущества программируемой системы на кристалле PSoC, как наличие блоков АЦП, ЦАП, усиления и обработки измерительных сигналов в пределах одной микросхемы, возможность объединения этих блоков в единую схему и возможность перестройки схемы программным способом, делают ее удобной для использования в приборостроении.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЯ ВФХ НА ОСНОВЕ PSoC 4

В качестве примера автоматизации средства измерений на основе PSoC рассмотрим измеритель ВФХ полупроводниковых диодов. В основе работы измерителя лежит частотный метод измерения емкости [11], суть которого заключается в определении значения емкости C_X диода путем измерения частоты колебаний LC-автогенератора. При измерении исследуемый диод подключается к параллельному LC-контур и вызывает отклонение частоты колебаний автогенератора от f_0 до f_X . Расчет емкости диода выполняется по формуле:

$$C_X = \left[\left(\frac{f_0}{f_X} \right)^2 - 1 \right] \cdot C_0, \quad (1)$$

где C_0 – сумма емкости LC-контра и емкости монтажа, определяемая путем измерения емкости образцового

конденсатора.

Для обеспечения высокой разрешающей способности при измерении существенно нелинейных ВФХ гетеропереходных светодиодов автогенератор измерителя ВФХ спроектирован таким образом, что амплитуда тестового сигнала, подаваемого на объект измерения, а именно амплитуда сигнала в LC-контуре, регулируется в диапазоне 0,1...5 мВ. При этом уровень выходного сигнала LC-автогенератора должен быть достаточным для уверенной работы частотомера. Для решения поставленной задачи была использована схема двухкаскадного усилителя с общим коэффициентом усиления порядка 60 дБ. Между каскадами усиления включена цепь фазовой коррекции, обеспечивающая выполнение условия баланса фаз в схеме LC-автогенератора. Стабилизацию амплитуды выходного сигнала осуществляет схема автоматической регулировки усиления, реализованная на транзисторе КП303. Регулировка амплитуды тестового сигнала производится цепью обратной связи. Частота свободных колебаний автогенератора составляет 120 кГц. Это значение выбрано из условия обеспечения диапазона измерения емкости от единиц до сотен пФ, в пределах которого перестройка LC-контра не приводит к срыву колебаний автогенератора.

Управление измерителем ВФХ осуществляется компьютером через последовательный интерфейс RS232. Перед выполнением измерения оператор задает значения нижней и верхней границ диапазона и шага изменения напряжения смещения. График ВФХ выводится на экран компьютера в процессе измерения в режиме реального времени. Программа также позволяет осуществлять обработку измеренных данных: вычислять производную ВФХ по напряжению, строить график распределения концентрации носителей заряда в активной области диода.

Структурная схема измерителя ВФХ представлена на рисунке 2.

Аппаратная часть выполнена на основе PSoC 4 типа CY8C4245AXI-483. На PSoC 4 реализованы следующие функциональные блоки: универсальный асинхронный приемопередатчик UART, осуществляющий обмен данными между компьютером и PSoC; ЦАП, задающий напряжение смещения на объекте измерения; АЦП, осуществляющий измерение напряжения смещения на объекте; повторитель напряжения, выполняющий функцию буферного каскада между объектом измерения и АЦП; частотомер, осуществляющий измерение частоты колебаний LC-автогенератора. LC-автогенератор, компаратор, усилитель и делитель напряжения выполнены в виде отдельных печатных узлов.

Принцип работы измерителя ВФХ заключается в следующем.

В начале измерительного цикла через интерфейс RS232 PSoC получает от компьютера код значения напряжения смещения, которое необходимо установить на контролируемом диоде. На выходе ЦАП формируется соответствующее напряжение, поступающее на усилитель напряжения с коэффициентом усиления $K_u = 8$, выполненном на высоковольтном ОУ ОРА445АР. ЦАП, входящий в структуру PSoC 4, позволяет устанавливать напряжения

в диапазоне 0–5 В. Следовательно, диапазон напряжений смещения на объекте измерения составляет 0–40 В. Контроль установленного на диоде напряжения выполняется путем его измерения с помощью встроенного АЦП после уменьшения уровня постоянного напряжения с помощью делителя в $K_d = 8$ раз.

После подачи напряжения смещения на диод за счет изменения его барьерной емкости происходит изменение частоты колебаний LC-автогенератора. С выхода LC-автогенератора гармоническое колебание с частотой f_x подается на первый сигнальный вход компаратора MAX907. Второй сигнальный вход компаратора заземлен. На выходе компаратора формируется импульсная последовательность с частотой f_x и подается на вход частотомера, реализованного на PSoC.

Измерение частоты осуществляется методом дискретного счета путем подсчета числа импульсов, прошедших на счетчик в течение действия стробирующего импульса. Стробирующий импульс формируется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) спустя время задержки 500 мс после установки напряжения на выходе ЦАП, необходимого на установление частоты колебаний LC-автогенератора. Тактирование ШИМ осуществляется с частотой 60 кГц. Для задания временных ворот длительностью 1 с период ШИМ сигнала установлен равным 60 000 тактовых импульсов. Синхронизаторы 1 и 2 синхронизируют передние фронты ШИМ-сигнала и импульса, поступающего с выхода компаратора, и подают их на 24-разрядный счетчик. По окончании действия стробирующего импульса счетчик останавливается. Полученное значение численно

равно частоте колебаний LC-автогенератора f_x в Гц.

Измеренные значения частоты f_x и напряжения смещения на диоде U_{CM} через UART передаются в компьютер, где производится расчет емкости C_x объекта измерения по формуле (1), соответствующее напряжению смещения U_{CM} . После этого производится обнуление счетчика и остановка ШИМ. На этом измерительный цикл завершается. Компьютерная программа управления увеличивает значение напряжения смещения на величину шага и пересылает его код в PSoC. Измерение выполняется до тех пор, пока U_{CM} не достигнет установленного максимального значения.

Основные технические характеристики измерителя ВФХ:

- диапазон измерения емкости от 10^{-12} до 10^{-9} Ф;
- диапазон обратных напряжений смещения от 0 до 40 В;
- минимальный шаг изменения напряжения смещения 150 мВ;
- диапазон изменения амплитуды тестового сигнала 0,1...5 мВ;
- разрешение по емкости 10^{-14} Ф;
- кратковременная относительная нестабильность частоты автогенератора $5 \cdot 10^{-6}$;
- максимальная относительная долговременная нестабильность – $1,5 \cdot 10^{-5}$;
- методическая погрешность измерения емкости не более 0,002%.

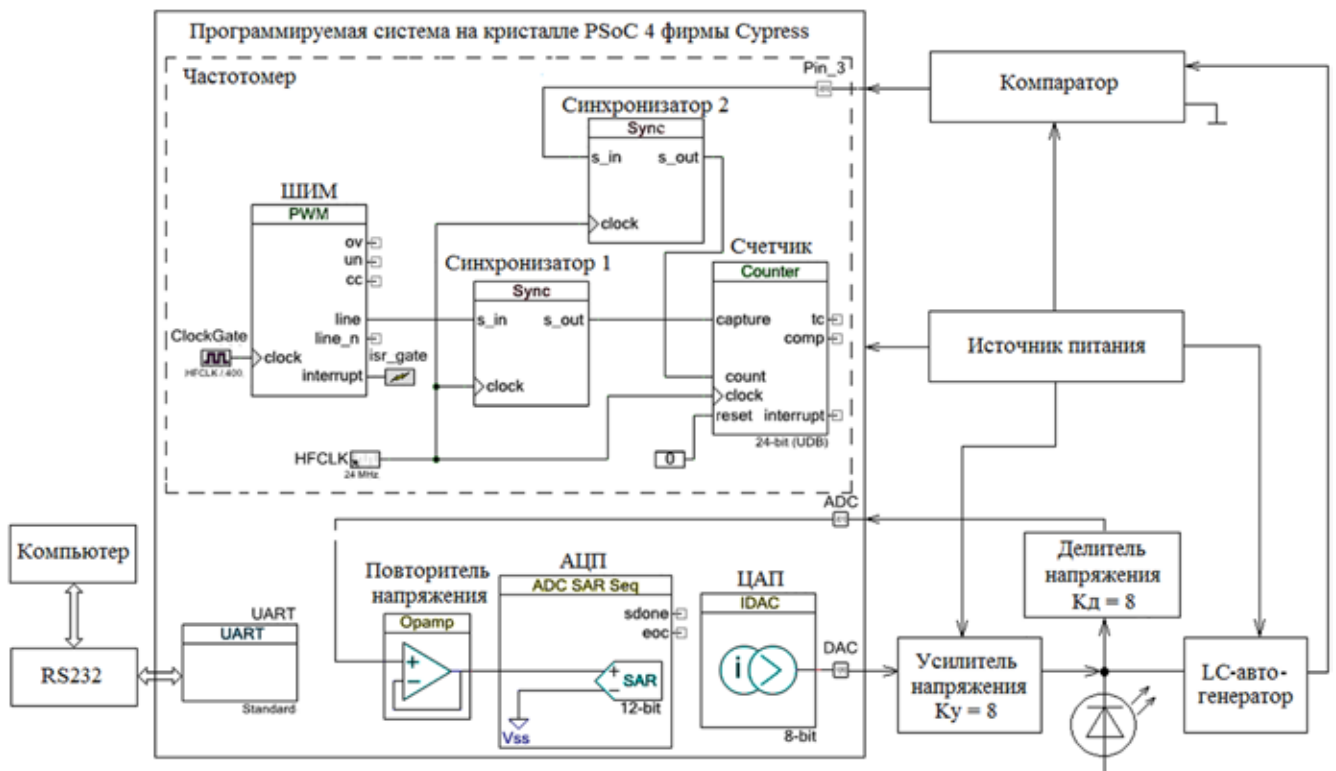


Рис. 2. Структурная схема измерителя ВФХ полупроводниковых диодов (на примере светодиода)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены возможности и особенности автоматизации процессов измерения электрических характеристик ППП с использованием программируемой системы на кристалле PSoC 4 фирмы Cypress. Показано, что система PSoC является удобным инструментом при проектировании автоматизированных средств измерения. В качестве примера практической реализации представлен автоматизированный измеритель ВФХ полупроводниковых диодов. Благодаря реализации измерительного блока на программируемой системе на кристалле PSoC 4 удалось значительно улучшить массо-габаритные показатели по сравнению с ранее разработанной установкой для измерения ВФХ [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измеритель иммитанса E7-20. Технические характеристики. – URL: <http://mnipi.com>.
2. 4200-SCS Semiconductor Characterization System Technical Data. – URL: <http://www.keithley.com/data?asset=4527>.
3. Сергеев В.А., Фролов И.В., Широков А.А. Автоматизированная установка для измерения вольт-фарадных характеристик гетеропереходных светодиодов с повышенным разрешением // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 1. – С. 137–138.
4. Радаев О.А., Сергеев В.А. Установка для исследования пороговых токов начала свечения светоизлучающих диодов // Радиоэлектронная техника : межвузовский сборник научных трудов. – Ульяновск : УлГТУ, 2015 (2). – С. 249–243.
5. Кулапин В.И., Князьков А.В., Данилкина Н.В. Измерительный преобразователь для резистивно-емкостного датчика на микроконтроллере // Тр. Международ. симпозиума «Надежность и качество». – 2013. – Т. 2. – С. 61–62.
6. Крылов С.М., Бурамбаева Н.А. Система дистанционного выполнения реальных лабораторных работ REM-LAB. – URL: <http://www.enu.kz/repository/repository2012/pdf/42.pdf>.
7. Аронов В.Л., Федотов Я.А. Испытание и исследование полупроводниковых приборов : учебн. пособие для специальностей полупроводниковой техники вузов. – М. : Высшая школа, 1975. – 325 с.
8. Сергеев В.А., Фролов И.В. Погрешность измерения дифференциального сопротивления нелинейных двухполюсников // Измерительная техника. – 2013. – № 12. – С. 45–49.
9. Сергеев В.А., Фролов И.В. Методическая погрешность измерения нелинейной емкости // Измерительная техника. – 2014. – №3. – С. 65–69.
10. ГОСТ 18986.14–85. Диоды полупроводниковые. Методы измерения дифференциального и динамического сопротивлений. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2004.
11. ГОСТ 18986.4–73. Диоды полупроводниковые. Методы измерения емкости. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2000.
12. Урлапов О.В. Система на кристалле PSoC – использование в научном приборостроении // Радиоэлектронная техника. – 2013. – № 1. – С. 220–224.
13. PSoC® 4: PSoC 4200 Family Datasheet. – URL: <http://www.cypress.com/file/138656/download>.

REFERENCES

1. *Izmeritel immitansa E7-20. Tekhnicheskie kharakteristiki* [E7-20 Immitance Tester. Specification]. Available at: <http://mnipi.com>.
2. *4200-SCS Semiconductor Characterization System Technical Data*. Available at: <http://www.keithley.com/data?asset=4527>.
3. Sergeev V.A., Frolov I.V., Shirokov A.A. *Avtomatizirovannaia ustanovka dlia izmereniia voltfaradnykh kharakteristik geteroperekhodnykh svetodiodov s povyshennym razresheniem* [Computer-Aided Device for Measuring the Capacity-Voltage Characteristics of Heterotransition High-Resolution LEDs]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2014, no. 1, pp. 137–138.
4. Radaev O.A., Sergeev V.A. *Ustanovka dlia issledovaniia porogovykh tokov nachala svecheniia svetoizluchaiushchikh diodov* [Device for Researching Threshold Current to Light LEDs]. *Radioelektronnaia tekhnika. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov* [Radioengineering Devices. Inter-University Proceedings]. Ulyanovsk, UlSTU Publ., 2015 (2), pp. 249–243.
5. Kulapin V.I., Kniazkov A.V., Danilkina N.V. *Izmeritelnyi preobrazovatel dlia rezistivno-emkostnogo datchika na mikrokontrollere* [Measuring Converter for Resistance-Capacitance Probe with Microcontroller]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma 'Nadezhnost i kachestvo'* [Proc. of Int. Symposium 'Reliability and Quality'], 2013, vol. 2, pp. 61–62.
6. Krylov S.M., Burambaeva N.A. *Sistema distantsionnogo vypolneniia realnykh laboratornykh rabot REM-LAB* [REM-LAB System for Remote Real Laboratory Operations]. Available at: <http://www.enu.kz/repository/repository2012/pdf/42.pdf>.
7. Aronov V.L., Fedotov Ya.A. *Ispytanie i issledovanie poluprovodnikovyykh priborov. uchebn. posobie dlia spetsialnostei poluprovodnikovoi tekhniki vuzov* [Testing and Researching of Semiconductor Devices. Textbook for Higher Educational Institutions for Semiconductor Engineering]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1975. 325 p.
8. Sergeev V.A., Frolov I.V. *Pogreshnost izmereniia differentsialnogo soprotivleniia nelineinykh dvukhpoliusnikov* [The Error When Measuring the Differential Resistance of Nonlinear Two-Terminal Networks]. *Izmeritelnaia tekhnika* [Measurement Techniques], 2013, no. 12, pp. 45–49.
9. Sergeev V.A., Frolov I.V. *Metodicheskaia pogreshnost izmereniia nelineinoi emkosti* [Methodical Error in Measuring Nonlinear Capacity]. *Izmeritelnaia tekhnika* [Measurement Techniques], 2014, no. 3, pp. 65–69.

10. GOST 18986.14–85. *Diody poluprovodnikovye. Metody izmereniia differentsialnogo i dinamicheskogo soprotivleniia* [Semiconductor Diodes. Methods for Measuring Differential and Slope Resistances]. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov Publ., 2004.

11. GOST 18986.4–73. *Diody poluprovodnikovye. Metody izmereniia emkosti* [Semiconductor Diodes. Methods for Measuring Capacitance]. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov Publ., 2000.

12. Urlapov O.V. Sistema na kristalle PSoC – ispolzovanie v nauchnom priborostroenii [System on Chip PSoC. Application in Engineering Sciences]. *Radioelektronnaia tekhnika* [Radioengineering Instruments], 2013, no. 1, pp. 220–224.

13. PSoC® 4: PSoC 4200 Family Datasheet. Available at: <http://www.cypress.com/file/138656/download>.