

ных сигналов модуля. Так, если предварительно записать в ОЗУ одного из каналов в четные адреса логическую «1», а в нечетные — логический «0» и подать на вход F сигналы частотой 1 МГц. то на выхольном разьеме соответствующем выбранному

Формат данных при команде чтения

R8		R1
----	--	----

Содержимое ячейки памяти 8-го канала Содержимое ячейки памяти 1-го канала

- $A(0) F(16)$ — перезапись счетчика адреса ОЗУ (ПЗУ);
 $A(0) F(17)$ — перезапись данных в ОЗУ по адресу, соответствующему содержимому счетчика адреса, добавление «1» к этому содержимому.

Формат данных при команде перезаписи

W8		W1
----	--	----

Данные для ОЗУ 8-го канала Данные для ОЗУ 1-го канала

- $A(0) F(25)$ — пуск считывания содержимого ОЗУ (ПЗУ);
 $A(i) F(16)$ — перезапись содержимого ОЗУ i -го канала по адресу, соответствующему содержимому счетчика адреса ($i=1, \dots, 8$);
 $A(i) F(17)$ — перезапись содержимого ОЗУ i -го канала по адресу, соответствующему содержимому счетчика адреса, добавление «1» к этому содержимому ($i=1, \dots, 8$).

Модуль предназначен для систем автоматизации физических экспериментов и АСУ ТП.

Авторы выражают благодарность С. В. Бредихину и В. С. Якушеву за полезные обсуждения.

Поступило в редакцию 26 марта 1981 г.

УДК 621.317.73

В. П. КЕНЗИН, С. П. НОВИЦКИЙ
(Новосибирск)

**АВТОКОМПЕНСАЦИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
 КОМПЛЕКСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ — НАПРЯЖЕНИЕ,
 ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ТРЕБУЕМУЮ ПОЛЯРИЗАЦИЮ
 ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА**

Изучение термодинамических и физико-химических свойств различных объектов, например биологических и электрохимических, требует проведения быстрого автоматического измерения параметров комплексных величин в области низких и инфранизких частот при автоматическом поддержании нужного измерительного режима объекта по постоянному току [1]. Такие измерения сравнительно нетрудно выполнить на основе автокомпенсационных электроизмерительных цепей уравнивания, теоретические основы и вопросы практической реализации которых изложены в ряде монографий (см., например, [2, 3]). Эти устройства имеют высокое быстродействие и точность измерения. Важнейшим узлом таких устройств, определяющим в конечном итоге точность измерения, является измерительный преобразователь комплексной величины (ИПКВ) в активный сигнал (напряжение или ток). Отличительная особенность ИПКВ для биологических и электрохимических объектов — наличие в его составе цепи поляризации объекта по постоянному току.

Известные автокомпенсационные ИПКВ [4] для развязки цепи преобразования комплексной величины и цепи задания требуемого измерительного режима по постоянному току используют разделительные цепи и фильтры; в области инфранизких

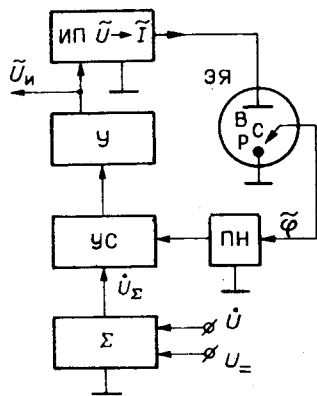


Рис. 1.

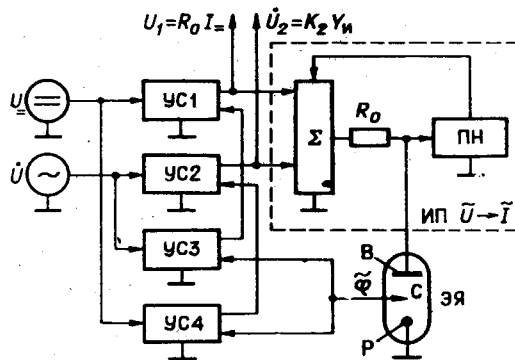


Рис. 2.

частот такие ИПКВ не могут обеспечить быстрого преобразования (в течение одного-двух периодов измеряемого сигнала). Это побудило авторов данной статьи создать новые автокомпенсационные ИПКВ, которые работали бы на инфранизких частотах с заданием необходимого измерительного режима объекта по постоянному току. Предложенные нами ИПКВ обеспечивают получение требуемого комплекса информативных параметров и могут быть непосредственно включены в состав автоматизированных (на основе ЭВМ) систем для научных электрохимических и биологических исследований.

Структурная схема простейшего ИПКВ с одним контуром автоматического регулирования, отвечающего указанным выше требованиям, приведена на рис. 1. Объектом исследований является электрохимическая ячейка (ЭЯ) с электролитом, в который погружены рабочий (Р), сравнивающий (С) и вспомогательный (В) электроды. Преобразование измеряемой комплексной проводимости Y_n между Р- и С-электродами в напряжение U_n и поддержание разности потенциалов между ними $\varphi = \varphi_- - \varphi_+$ равной напряжению поляризации $U = U_+$ выполняются следующим образом. Переменное напряжение \dot{U} и постоянное поляризующее напряжение U_- , изменяющееся по требуемой для эксперимента программе, суммируются в сумматоре Σ , на выходе которого напряжение

$$\dot{U}_\Sigma = \dot{U} + U_- \quad (1)$$

Оно поступает на один из входов устройства сравнения (УС), на второй вход которого через повторитель напряжения (ПН) подается разность потенциалов φ между Р- и С-электродами, равная

$$\tilde{\varphi} = \varphi_- + \dot{\varphi} \quad (2)$$

φ_- и $\dot{\varphi}$ — постоянная и переменная составляющие разности потенциалов $\tilde{\varphi}$. При этом напряжение разбаланса, выделенное устройством сравнения (УС) и усиленное усилителем (У), с учетом (1) и (2) можно представить в виде

$$U_n = K_y (\tilde{\varphi} - U_\Sigma) = U_{n-} + \dot{U}_n \quad (3)$$

K_y — коэффициент передачи усилителя напряжения У, $U_{n-} = K_y (\varphi_- - U_-)$ и $\dot{U}_n = K_y (\dot{\varphi} - \dot{U})$ — постоянная и переменная составляющие напряжения U_n . Измерительный преобразователь (ИП) $\dot{U} \rightarrow \dot{I}$ формирует из напряжения U_n ток \dot{I} , протекающий через электрохимическую ячейку, но не зависящий от ее проводимости, равный

$$\tilde{I} = K_{ип} \tilde{U}_n = K_{ип} U_{n-} + K_{ип} \dot{U}_n = I_- + \dot{I} \quad (4)$$

где $K_{ип}$ — коэффициент передачи ИП $\tilde{U} \rightarrow \tilde{I}$, $I_- = K_{ип} U_{n-}$ и $\dot{I} = K_{ип} \dot{U}_n$ — постоянная и переменная составляющие тока электрохимической ячейки.

Из уравнения (4) видно, что значение постоянной составляющей тока ячейки I_- (тока поляризации) при известном $K_{ип}$ можно отсчитать непосредственно по значению постоянной составляющей U_{n-} напряжения U_n .

Выражение для искомой комплексной проводимости участка Р — С электроды, как следует из рис. 1, может быть записано в форме

$$Y_n = \dot{I} / \tilde{\varphi} = K_{ип} \dot{U}_n / \tilde{\varphi} \quad (5)$$

Пренебрегая погрешностью статизма контура автоматического регулирования, примем $\tilde{\varphi} = \dot{U}$. В этом случае уравнение (5) преобразуется к виду

$$Y_n = K_{ип} \dot{U}_n / \dot{U} = K_1 \dot{U}_n \quad (6)$$

Здесь $K_1 = K_{ип}/U$ — коэффициент преобразования (известная величина). Из уравнения (6) следует, что искомую комплексную проводимость участка P—C электроды электрохимической ячейки можно непосредственно отсчитывать по значению переменной составляющей $U_{н}$ напряжения $U_{н}$.

Рассматриваемую структуру (см. рис. 1) целесообразно использовать при сравнимых значениях $|\varphi|$ и φ_{-} . В этом случае будет иметь место примерно равная статистическая погрешность преобразования $Y_{н} \rightarrow U$ и $I_{н-} \rightarrow U_{н-}$.

При проведении электрохимических исследований зачастую требуется, чтобы переменная составляющая напряжения на участке P—C электроды не превышала по модулю единиц милливольт, в то время как диапазон регулирования φ_{-} имеет интервал от 0 до $\pm 2,5$ В.

В таких случаях использование простейшей структуры ИПКВ привело бы к различию статических погрешностей поддержания φ_{-} и $|\varphi|$ на два-три порядка, и для решения задачи становится необходимым более совершенный ИПКВ [5], структурная схема которого приведена на рис. 2. Основные условные обозначения здесь такие же, как на рис. 1. Более подробно изображен измерительный преобразователь напряжения в ток ИП $U \rightarrow I$ [6]. Он содержит сумматор Σ , образцовый резистор R_0 и повторитель напряжения (ПН). В рассматриваемом ИПКВ проводится вначале сравнение напряжения поляризации U_{-} и гармонического напряжения U в

устройствах сравнения УСЗ и УС4 с разностью потенциалов $\tilde{\varphi} = \varphi_{-} + \varphi$ между P- и C-электродами. На выходах этих устройств формируются соответственно напряжения $U_3 = \varphi_{-}$ и $U_4 = \varphi$, которые поступают в устройства сравнения УС1 и УС2, где сопоставляются соответственно с напряжениями U_{-} и U . Полученные разности напряжений усиливаются в блоках УС1 и УС2 и затем поступают в измерительный преобразователь ИП $U \rightarrow I$, формирующий ток, равный

$$I = (U_1 + U_2)/R_0 = I_{-} + I, \quad (7)$$

где I/R_0 — коэффициент преобразования ИП $U \rightarrow I$; U_1 и U_2 — выходные напряжения устройств сравнения УС1 и УС2; $I_{-} = U_1/R_0$ и $I = U_2/R_0$ — постоянная и переменная составляющие тока I . Таким образом, ток I не зависит от проводимости ячейки и разности потенциалов φ_{-} на ее электродах (значение постоянной составляющей тока ячейки I_{-} может быть отсчитано по значению напряжения U_1).

Учитывая, что $|\varphi| \cong |U|$, выражение для комплексной проводимости $Y_{н}$ участка P—C электроды можно записать в виде $Y_{н} = I/\varphi \cong U_2/R_0U$, откуда имеем $U_2 = K_2 Y_{н}$, где $K_2 = R_0U$ — коэффициент преобразования.

Таким образом, комплексная проводимость $Y_{н}$ может быть отсчитана непосредственно по значению выходного напряжения U_2 .

Заметим, что рассмотренные структурные схемы ИПКВ пригодны и для преобразования комплексных параметров двухполюсных объектов. В этом случае при построении ИПКВ по структуре рис. 1 необходимо к выходу ИП $U \rightarrow I$ подключить исследуемый двухполюсник и вход повторителя напряжения ПН, при построении ИПКВ по структуре рис. 2 — исследуемый двухполюсник и входы устройств сравнения УСЗ и УС4.

На основе рассмотренных структурных схем, используя стандартную элементную базу, авторы разработали ряд измерительных преобразователей комплексных проводимостей в напряжение. Здесь мы охарактеризуем три модификации ИПКВ, наиболее пригодные для практического использования. Рассматриваемые преобразователи испытывались на моделях из RC-элементов в интервале температур 15—35°C. Общими характеристиками преобразователей являются диапазон комплексных проводимостей $10^{-1} - 10^{-6}$ См при $\text{tg } \delta = 0,1 - 10$ и диапазон потенциостатирования $0 \div \pm 2,5$ В при изменении тока поляризации от $\pm 10^{-5}$ до $\pm 10^{-2}$ А.

Вначале охарактеризуем две модификации ИПКВ, изготовленные по схеме рис. 1. Первая из них, собранная на усилительных элементах типа К140УД1Б, имеет следующие характеристики: значение модуля относительной погрешности преобразования комплексной проводимости в напряжение $|\delta Y_{н}|$, вычисленное по методу, изложенному в [7], в полосе частот $10^{-3} - 10^4$ Гц не превышает 3%; статическая погрешность поддержания заданного напряжения ± 2 мВ; максимальная скорость нарастания напряжения при резистивной нагрузке 10 В/мс. Во второй модификации ИПКВ узлы УС и У (см. рис. 1) выполнены на микросхемах 701МЛ19, остальные узлы — на микросхемах К140УД1Б. Этот ИПКВ имеет погрешность преобразования $|\delta Y_{н}| \leq 0,1\%$ в полосе частот $10^{-3} - 10^3$ Гц, статическую погрешность поддержания заданного напряжения $\pm 0,1$ мВ, максимальную скорость нарастания напряжения 0,1 В/мс; применение микросхем 701МЛ19 повышает отдельные метрологические характеристики преобразователя по сравнению с первой модификацией, но в некоторых случаях может ограничивать его использование, поскольку он имеет в два раза большие габариты и примерно в десять раз большую стоимость.

Хороший компромисс между стоимостью и техническими характеристиками, на наш взгляд, достигается в ИПКВ, реализованном по схеме рис. 2 на микросхемах К140УД1Б. В этом преобразователе сравнительно нетрудно удается в полосе частот $10^{-3} - 10^4$ Гц снизить погрешность преобразования до $|\delta Y_{н}| \leq 0,5\%$ и стати-

ческую погрешность поддержания заданного напряжения до ± 1 мВ и обеспечить максимальную скорость нарастания напряжения 1 В/мс.

Таким образом, на основе предложенных принципов построения ИПКВ оказалось возможным строить сравнительно несложные, достаточно точные (класса 0,1—0,5) и с умеренной стоимостью измерительные преобразователи комплексной проводимости в напряжение для двух- и трехполюсных объектов при одновременном поддержании между определенными полюсами объекта требуемого измерительного режима по постоянному току.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахутин В. М. и др. Применение частотных методов для исследования физиологических объектов.— В кн.: Бионика и математическое моделирование в биологии: Семинар. Киев: изд. ИК АН УССР, 1966.
2. Карандеев К. Б. и др. Быстродействующие электронные компенсационно-мостовые приборы.— М.: Энергия, 1970.
3. Измерение комплексных проводимостей в физико-химическом эксперименте: Сб. — М.: Энергия, 1970.
7. Гриневич Ф. Б. Автоматические мосты переменного тока.— Новосибирск: изд. РИО СО АН СССР, 1964, с. 12.

*Поступило в редакцию 6 декабря 1978 г.;
окончательный вариант — 11 февраля 1981 г.*

УДК 537.311.33.082.52

Б. С. ВАКАРОВ, И. С. ВАКАРОВА, В. Н. ВИШНЯКОВ
(Одесса)

ФОТОПРИЕМНИК НА ОСНОВЕ БАРЬЕРА ШОТТКИ И ИЗОТИПНОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДА

В ряде работ [1—3] сообщается о фоточувствительных структурах, обладающих инверсией знака в спектре фототока и представляющих, таким образом, определенный интерес с точки зрения их использования в оптоэлектронных устройствах [4]. Указанная особенность фототока обусловлена разделением генерируемого светом носителей тока двумя расположенными на различной глубине слоями объемного заряда со встречно-направленными внутренними электрическими полями.

В настоящей работе приведены результаты исследования фотоэлектрических свойств структуры металл — $n^+Al_xGa_{1-x}As$ — $nGaAs$, являющейся комбинацией барьера Шоттки (металл — $n^+Al_xGa_{1-x}As$) и гетероперехода ($n^+Al_xGa_{1-x}As$ — $nGaAs$). Присутствие в данной структуре двух неэквивалентных областей пространственного заряда определяет форму кривой спектрального распределения фототока: в ней наблюдаются две точки, в которых фототок меняет знак.

Изотипные гетеропереходы $Al(GaAs)$ — $GaAs$ создавались жидкофазным эпитаксиальным наращиванием на $GaAs$ -подложку твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ с различной величиной молярной доли алюминия ($0,2 < x < 0,7$). Эпитаксиальные слои легировались теллуром, и толщина их после обработки поверхности для нанесения слоя металла составляла 20—30 мкм. Выращенные твердые растворы имели переменный состав в направлении, перпендикулярном поверхности слоя, их ширина запрещенной зоны убывала по мере удаления от границы раздела с градиентом около 0,01 эВ/мкм. Концентрация носителей в $GaAs$ -подложке составляла величину $\sim 10^{16}$ см $^{-3}$, а уровень легирования эпитаксиального слоя был заметно выше 10^{18} см $^{-3}$. Омический контакт к подложке осуществлялся сплавлением In [5], а барьер Шоттки — химическим осаждением [6] полупрозрачного слоя золота на обработанную стандартными методами поверхности твердого раствора.

Исследование фотоэлектрических свойств структуры проводилось методом синхронного детектирования в режиме тока короткого замыкания при нулевом смещении и при подаче смещения обеих полярностей. Освещение структуры осуществлялось со стороны твердого раствора.

Результаты измерений при ~ 300 К спектрального распределения фототока I_{ϕ} структур с различным значением параметра x показаны на рис. 1. В спектрах фоточувствительности содержится две точки инверсии знака фототока, причем для всех