

УДК 621.317.733

## ИЗМЕРИТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

В. Н. Вьюхин, Ю. А. Попов

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: vvn@iae.nsk.su  
popov@iae.nsk.su*

Представлен разработанный прибор для исследования температурной зависимости мало-сигнальной ёмкости и тока полупроводниковых структур в диапазоне от  $-180$  до  $+300$  °С.

*Ключевые слова:* измерительные цепи, измерительная головка, полупроводниковые структуры, дельта—сигма-АЦП, усилитель.

**Введение.** Исследования зависимостей ёмкости и тока МДП-структур и других полупроводниковых приборов (диоды Шоттки,  $p-n$ -переходы) от температуры дают важную информацию о поведении их электрофизических параметров. Существующие универсальные и специализированные приборы для измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур [1–3] не приспособлены для температурных измерений, так как не имеют средств для подключения исследуемой структуры, размещённой в термокамере, к измерительному прибору.

В данной работе приведены методики измерений, наиболее интересные технические решения и результаты испытаний прибора, ориентированного на измерение температурных зависимостей ёмкости и тока полупроводниковых структур. Прибор снабжён выносной измерительной головкой (ИГ), которая устанавливается на корпусе термокамеры и соединяется с базовым электронным блоком линией связи. Такое решение позволяет снизить ошибки и повысить помехоустойчивость измерений за счёт сокращения длины линии связи от исследуемой структуры до измерительной цепи. Важная особенность прибора состоит в том, что измерения ёмкости и тока производятся одновременно, а диапазоны их измерений устанавливаются независимо [4]. Таким сочетанием характеристик не обладают известные аналоги [1–3]. В существующих подобных приборах измерение двух параметров производится поочерёдно (путём переключения аппаратных и программных опций [1, 3]) либо совместно, но с зависимыми шкалами [5]. Одновременность и независимость измерений позволяет снизить аппаратные затраты, расширить динамический диапазон и повысить скорость измерений.

**Измерительная головка** крепится на корпусе термокамеры, внутри которой установлены нагреватель, платиновый термометр сопротивления и исследуемая полупроводниковая структура. Для достижения низких температур в термокамеру заливается жидкий азот. Блок-схема головки приведена на рис. 1. Базовый электронный блок задаёт на исследуемую структуру режимный сигнал, включающий постоянное смещение, и малый тестовый сигнал измерения ёмкости с частотой  $f_t$ . Измерительная цепь выполнена на основе операционного усилителя (ОУ) У1, включённого по схеме интегратора, и обеспечивает для подключённой структуры нулевое входное сопротивление — режим амперметра. Ключи К5—К7 коммутируют опорные конденсаторы  $C_0 = 10, 100, 1000$  пФ, которые задают диапазоны измерений ёмкости. Резисторы  $R_0$ , шунтирующие опорные конденсаторы, создают условия для интегратора по постоянному току, их номиналы выбраны такими, что

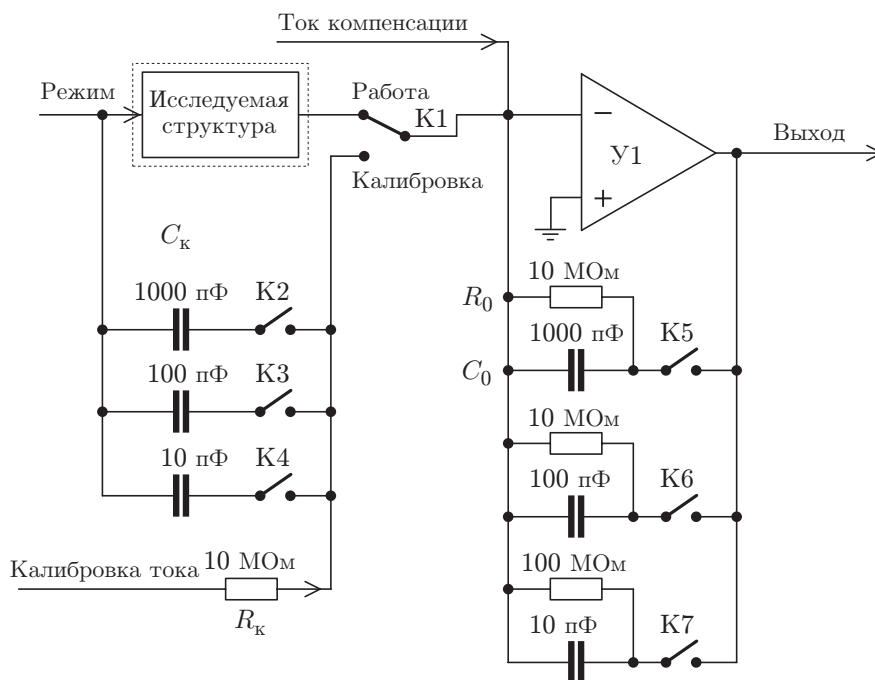


Рис. 1

на всех диапазонах гарантируется  $R_0 \gg 1/(\omega_t C_0)$ . При выполнении этого условия головка работает в режиме интегратора. Передаточная функция головки при измерении ёмкости линейная. Значение измеряемой ёмкости  $C_x$  вычисляется из выражения

$$C_x = (V_t/V_0)C_0, \quad (1)$$

где  $V_t, V_0$  — амплитуды тестового и выходного сигналов головки.

В режиме калибровки прибора релейным ключом К1 подключается ко входу головки блок, содержащий калибровочные конденсаторы  $C_k = 10, 100, 1000$  пФ и ключи К2—К4. Калибровка тока осуществляется подачей калиброванных напряжений на вход головки через резистор  $R_k = 10$  МОм.

В отличие от [5] в описываемом приборе диапазоны измерения ёмкости и тока устанавливаются независимо с помощью компенсационного метода измерения, при котором ток через исследуемую структуру автоматически компенсируется петлёй обратной связи (ОС).

Поскольку дальнейшая обработка выходного сигнала измерительной цепи осуществляется синхронным детектором, фазовый сдвиг усилителя У1 будет создавать дополнительную погрешность. Частотная характеристика ОУ обычно корректируется одним превалирующим полюсом, поэтому модуль амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазочастотная характеристика (ФЧХ) ОУ с замкнутой глубокой обратной связью выражаются в виде [6]

$$|K_{OC}| = K_0/\sqrt{1 + (f_t/f_0)^2}; \quad \varphi = -\arctg(f_t/f_0), \quad (2)$$

где  $K_{OC}, K_0$  — усиление ОУ с замкнутой и разомкнутой обратной связью на низкой частоте соответственно;  $f_0$  — частота среза ОУ.

При инверсном включении ОУ, имеющем однополюсную АЧХ (2), частота среза выражается как  $f_0 = f_1/(1 + K_{OC})$ , где  $f_1$  — частота единичного усиления ОУ, приводимая

в справочных данных. Исходя из изложенного и учитывая, что усиление цепи (см. рис. 1)  $|K_{OC}| = C_x/C_0$ , ФЧХ из (2) можно записать в виде

$$\varphi = -\arctg\{(f_t/f_1)[1 + (C_x/C_0)]\}. \quad (3)$$

Отметим, что (2), (3) справедливы для ОУ с обратной связью по напряжению, коррекция АЧХ которых осуществляется одним превалирующим полюсом.

Абсолютная и относительная ошибки измерения ёмкостей  $\Delta C_x \varphi$ ,  $\delta C_x \varphi$ , вызванные фазовым сдвигом, определяются из геометрических построений:

$$\Delta C_x \varphi = 2V_t \int_0^\varphi \sin \varphi d\varphi = 2V_t(1 - \cos \varphi), \quad (4)$$

$$\delta C_x \varphi = \pi(1 - \cos \varphi). \quad (5)$$

Синхронный детектор на выходе даёт средневыпрямленное значение входного сигнала, поэтому относительная ошибка (5) получена делением (4) на средневыпрямленное значение тестового сигнала  $V_t$ . Ошибка (5) ограничивает достижимое усиление ИГ, для обеспечения её значения менее 1 % при тестовой частоте  $f_t = 1$  МГц и максимальном усилении равном 2 необходимо использовать ОУ с единичной полосой >40 МГц. Поскольку измерение ёмкости производится на переменном токе, то статические погрешности ОУ — смещение нуля по току и напряжению — влияют лишь на ошибку измерения тока. Поэтому необходимо использовать ОУ с входным током менее допустимой ошибки измерения тока.

**Базовый электронный блок** принимает и обрабатывает сигнал от головки и формирует режимный сигнал на исследуемую структуру. Структурная схема базового электронного блока приведена на рис. 2. Блок выполняет следующие функции: измерение сигналов ёмкости и тока, формирование режимного сигнала на исследуемую структуру, управление прибором на базе микроконтроллера (МК), связь с компьютером по шине USB, питание всех узлов прибора от блока питания (БП).

Для измерения сигналов используются четыре отдельных 16-разрядных дельта—сигма-АЦП типа AD7792: АЦП1 и АЦП2 определяют синусную и косинусную компоненты импеданса (в конкретном применении измерялась только ёмкостная составляющая) исследуемой структуры; АЦП3 и АЦП4 — ток и температуру соответственно. Применение четырёх дельта—сигма-АЦП вместо одного 4-канального позволяет уменьшить допустимую частоту измерений в 8 раз, что значительно снижает уровень шумов и помех и повышает чувствительность прибора. Последнее обеспечивается двумя свойствами дельта—сигма-АЦП: собственные шумы АЦП резко уменьшаются с понижением частоты; полоса пропускания цифрового фильтра АЦП пропорциональна частоте измерений, и её снижение уменьшает влияние внешних шумов и помех на ошибку измерения. Для подавления сетевой помехи выбирается одна из двух частот измерений: 100 или 16,6 Гц. При частоте 100 Гц гарантируется однократный нуль АЧХ для помехи 50 Гц (АЧХ имеет вид  $(\text{sinc})^1$ ). Более эффективное подавление сетевой помехи происходит при частоте измерений 16,6 Гц. В этом случае АЧХ АЦП имеет вид  $(\text{sinc})^3$  и подавление помехи в диапазоне частот 49–51 Гц будет более 100 дБ. Описанные здесь решения позволили получить очень высокую чувствительность при измерении ёмкости, тока и температуры.

Канал измерения ёмкости и проводимости включает входной коммутатор М1, активный фильтр верхних частот (ФВЧ) 2-го порядка, усилитель У2, фазоинвертор У3, два двухполупериодных синхронных детектора (СхД) и два АЦП. Входной коммутатор подключает на вход измерительной цепи сигнал с выхода ИГ или тестовый сигнал. Фазоинвертор У3 обеспечивает двухполупериодное выпрямление сигнала, что удваивает его

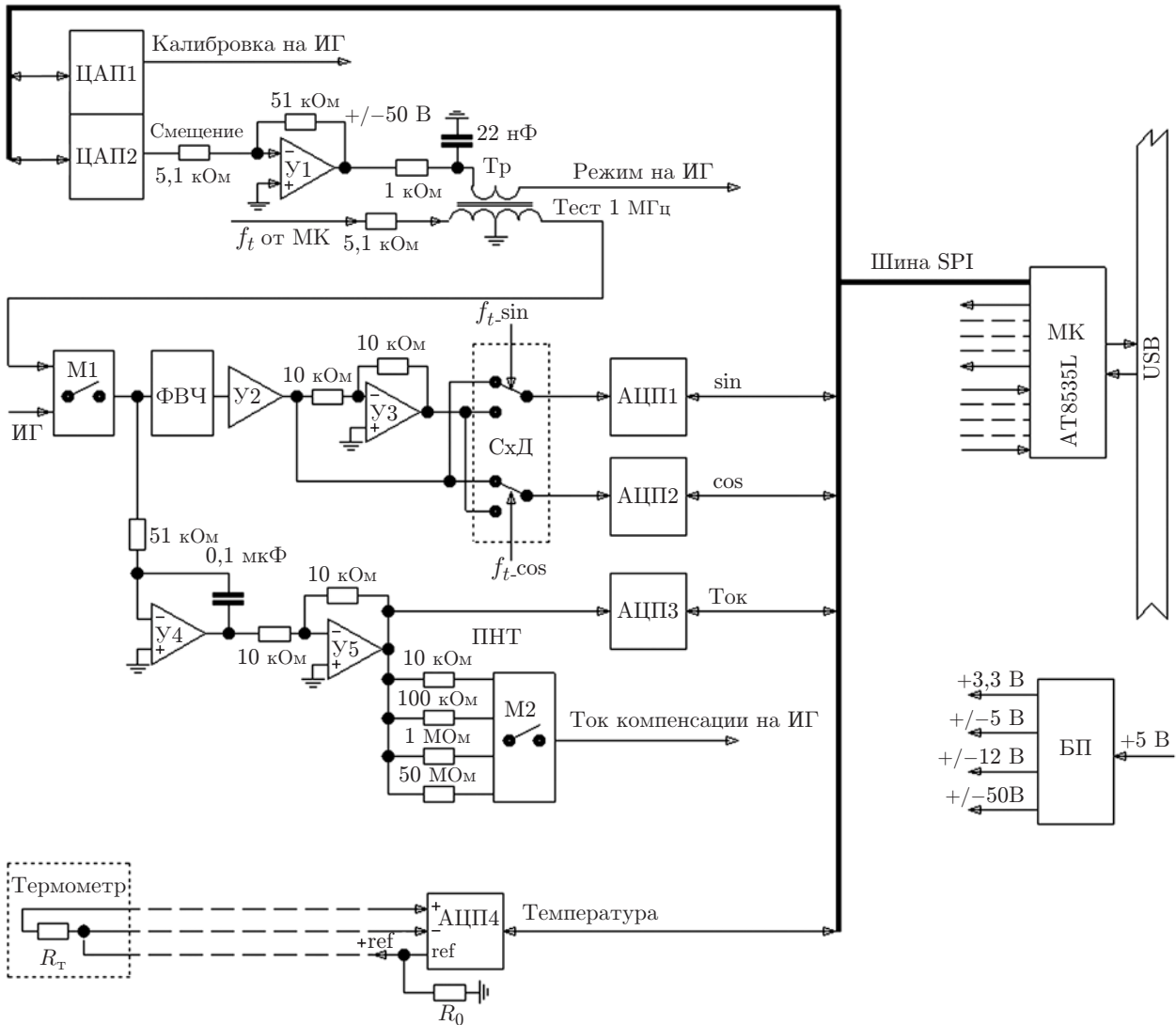


Рис. 2

коэффициент передачи. На управляющие входы синхронных детекторов от МК подаются квадратурные логические сигналы тестовой частоты  $f_t$  ( $f_{t\_sin}$  и  $f_{t\_cos}$  на рис. 2), выходы СхД фильтруются и измеряются АЦП.

Канал измерения тока включает интегратор У4, инвертор У5 и преобразователь напряжение — ток (ПНТ). Последний содержит набор диапазонных резисторов  $R_d$  и коммутатор М2. Выходной ток ПНТ поступает на вход измерительной головки, в которой операционный усилитель включён по схеме интегратора, поэтому вход головки имеет нулевой потенциал и для линейного ПНТ достаточно резистора. Приведённая на рис. 2 схема линейно преобразует выходное напряжение интегратора в ток. Измерительная головка, интегратор, инвертор и ПНТ образуют контур отрицательной ОС, который формирует ток, равный по величине и обратный по знаку постоянному току, протекающему через исследуемую полупроводниковую структуру. Мерой измеряемого тока служит выходное напряжение интегратора и подключённый к интегратору резистор. Диапазоны измерения тока задаются резисторами ПНТ и при указанных на рис. 2 номиналах равны  $\pm(0,1, 1, 50, 500)$  мкА. Полоса пропускания интегратора мала, и сигнал тестовой частоты с выхода коммутатора М1 не проходит в цепь измерения тока.

Формирователь режимного сигнала обеспечивает подачу на электрод исследуемой структуры суммы постоянного смещения и малого тестового сигнала с частотой  $f_t$ . Постоянное смещение формируется ЦАП2 и усилителем У1, тестовый сигнал 1 МГц суммируется со смещением на трансформаторе (Тр). ЦАП1 совместно с калибровочным резистором  $R_k$  устраняет сдвиг нуля ОУ головки по току при разомкнутом входе.

В канале измерения температуры используется трёхпроводная схема подключения платинового термометра сопротивления  $R_T$  с градуировкой 100 Ом или 1 кОм. АЦП AD7792 имеет внутренние генераторы тока для питания термометра и компенсации сопротивления линии связи. Ток питания протекает через опорный резистор  $R_0$ , падение напряжения на резисторе используется как образцовое для АЦП. Значение измеряемого резистора  $R_T$  вычисляется по формуле

$$R_T = (N/2^{15})R_0/K_y, \quad (6)$$

где  $N$  — результат измерения,  $K_y$  — выбранный коэффициент усиления внутреннего усилителя АЦП. Измерительный ток через термометр выбирается равным 0,2 или 1 мА.

Измерение температурной зависимости характеристик проводится следующим образом. Исследуемая структура с нагревателем помещается в контейнер с жидким азотом. На панели управления прибором задаются нижняя и верхняя границы температурного окна, в котором необходимо осуществлять измерения, и мощность нагрева, затем включается нагрев. При достижении нижней границы температурного окна начинается синхронная запись в память и вывод на экран зависимостей ёмкости, тока и температуры от времени. При достижении верхней границы температурного окна запись измерений прекращается и температура стабилизируется. Скорость изменения температуры регулируется мощностью нагрева. При проведении экспериментов обнаружена существенная помеха от мощных ШИМ-импульсов нагревателя. Этот эффект устраняется экранированием исследуемой структуры от нагревателя либо питанием нагревателя от регулируемого источника постоянного напряжения и ручной установки мощности нагрева.

#### Технические характеристики прибора:

- 1) диапазоны измерения ёмкости 10, 100, 1000 пФ;
- 2) диапазоны измерения тока 0,1, 1, 50, 500 мкА;
- 3) тестовый сигнал измерения ёмкости: частота 1 МГц, амплитуда 10 мВ;
- 4) напряжение смещения на структуру  $\pm 50$  В, шаг 0,1 В;
- 5) скорость измерений 16,6 и 100 Гц по каждому каналу, максимальный объём выборки  $30 \cdot 10^3$  отсчётов;
- 6) диапазон регулируемых температур от  $-180$  до  $+300$  °С;
- 7) чувствительность (средний квадрат шума) при частоте измерений 16,6 Гц:  $0,7 \cdot 10^{-15}$  и  $3 \cdot 10^{-15}$  Ф на шкалах 10 и 100 пФ, 2,7 и 50 пкА на шкалах 0,1 и 1 мкА, по температуре 0,01 °С;
- 8) ШИМ-регулятор мощности нагрева от источника +28 В/1 А;
- 9) вывод графиков на монитор и запись в файл.

Прибор подключается к шине USB компьютера, питание от сетевого адаптера 5 В  $\times$   $\times$  0,6 А. Прикладное программное обеспечение написано в среде LabWindows/CVI.

**Заключение.** В результате выполнения работы показано, что предложенный метод одновременного и независимого измерения двух параметров полупроводникового прибора — ёмкости и тока — существенно упрощает конструкцию измерительной головки и повышает скорость измерений; разработанная архитектура электронного блока обеспечивает высокую разрешающую способность, помехоустойчивость и скорость измерения температурной зависимости параметров полупроводниковых структур. При скорости 100 измер./с достигнута чувствительность, получаемая в аналогичных приборах при 1–10 измер./с.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **4200-SCS** Parameter Analyzer // Сайт компании "Keithley".  
URL: <http://www.keithley.com/products/semiconductor/parametricanalyzer/4200scs/?mn=4200-SCS> (дата обращения: 5.02.2013).
2. **Пузин И. Б., Хорунжий А. И.** Автоматический построитель вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур (С—V-характериограф) // ПТЭ. 1988. № 3. С. 223–227.
3. **Давыдов В. Н., Троян П. Е., Зайцев Н. Г., Беляев С. В.** Автоматизированный комплекс для исследования полупроводниковых структур // Изв. ТПУ. 2006. **309**, № 8. С. 42–46.
4. **Пат. 125713 РФ.** Устройство для измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводникового прибора /В. Н. Вьюхин. Опубл. 10.03.2013.
5. **Вьюхин В. Н., Попов Ю. А.** Прибор для исследования неравновесных явлений в полупроводниковых структурах // Автометрия. 2012. **48**, № 4. С. 73–78.
6. **Проектирование** и применение операционных усилителей /Под ред. Дж. Грэма, Дж. Тоби, Л. Хьюлсмана. М.: Мир, 1974. 509 с.

*Поступила в редакцию 5 февраля 2013 г.*

---