

УДК 621.317.733

## ПРИБОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕРАВНОВЕСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

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*

Создан прибор для исследования динамики релаксации неравновесной ёмкости и заряда в режиме неравновесного обеднения полупроводниковых МДП-структур. Разработаны методы измерений, которые обеспечивают по каналам измерения ёмкости и заряда чувствительность до 0,03 пФ и 0,02 пКл при длительности фронта 1,5 мкс и 0,7 мкс соответственно. Результаты получены при двойной амплитуде тестового сигнала измерения ёмкости  $\sim 15$  мВ и частоте 5 МГц. Реализован режим измерения вольт-фарадных характеристик при длительности развёртки до 100 с.

*Ключевые слова:* полупроводниковые структуры, измерительные цепи, измерение ёмкости и заряда, измерительная головка, фильтр, усилитель, синхронный детектор.

**Введение.** Исследования релаксации ёмкости, поверхностного потенциала, генерационного тока МДП-структур и других полупроводниковых приборов (диоды Шоттки,  $p$ - $n$ -переходы и т. д.) дают важную информацию об электрофизических параметрах этих приборов и приповерхностных свойствах полупроводников. Одновременное измерение релаксации ёмкости и генерационного тока к равновесному состоянию позволяет рассчитывать время жизни неосновных носителей и профиль легирования по глубине [1].

Описанные в литературе устройства для решения такой задачи имеют существенные недостатки: низкую производительность, обусловленную стробоскопическим режимом измерений, при котором за один цикл инъекции заряда осуществляется лишь одно измерение [1], низкое быстродействие ( $>100$  мкс) [2] и невозможность одновременно измерять релаксационную ёмкость и генерационный ток [3].

В данной работе приводится описание методов измерения, отдельные технические решения и результаты испытаний прибора для исследования неравновесных явлений в полупроводниковых структурах, лишённого указанных недостатков. Он обеспечивает широкий набор режимов измерения в диапазоне температур от комнатной до  $-180$  °С, а также измерение вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур при длительности развёртки до 100 с. Прибор состоит из двух частей: измерительной головки и базового электронного блока.

**Измерительная головка** помещается в криостат и работает при температуре, близкой к температуре жидкого азота. Назначение головки — приём сигналов от исследуемой структуры и преобразование их в переменное и постоянное напряжения, пропорциональные ёмкости и заряду. В головке реализован метод прямого измерения ёмкостного и постоянного токов, генерируемых исследуемой структурой после окончания импульса инъекции. В этом методе выходной электрод структуры всегда имеет нулевой потенциал и измерительная цепь не даёт обратной реакции на структуру (иными словами, это режим амперметра).

Рассмотрим несколько вариантов реализации режима амперметра. На рис. 1, *a* приведена наиболее распространённая схема измерения тока на базе усилителя в трансимпедансном включении, на рис. 1, *c* — измерительная цепь на базе интегратора, на рис. 1, *b* —

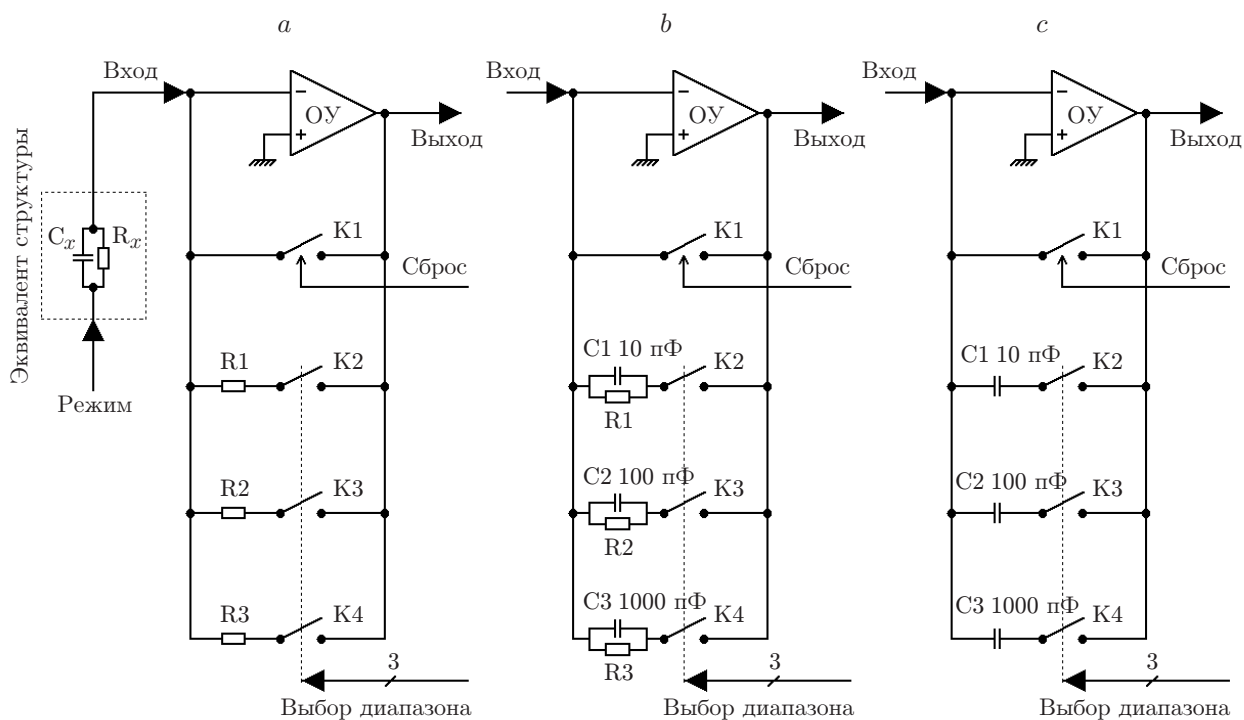


Рис. 1

смешанный вариант. Диапазоны измерений задаются переключением резисторов или конденсаторов в цепи обратной связи операционного усилителя (ОУ). Сигнал сброса подаётся одновременно с импульсом инъекции и замыкает цепь тока инъекции. Ключ К1 электронный, ключи К2—К4 релейные. Цепь на рис. 1, *a* при измерении ёмкости действует как дифференциатор, поэтому в дальнейшем измеряется косинусная компонента выходного сигнала (относительно фазы тестового сигнала). Для постоянного тока эта цепь действует как линейный преобразователь ток—напряжение. Цепь на рис. 1, *c* при измерении ёмкости действует как линейный ёмкостный делитель тестового сигнала с коэффициентом передачи  $K = C_x/C_0$ , где  $C_0, C_x$  — опорная и измеряемая ёмкости. Измерению подлежит синусная компонента выходного сигнала. Постоянный ток преобразуется в заряд, из которого постобработкой необходимо извлекать график тока. При выполнении условия  $R \gg 1/2\pi f_t C_0$  на всех диапазонах смешанная цепь на рис. 1, *b* для ёмкостного тока действует, как цепь на рис. 1, *c*, а для постоянного тока — как цепь на рис. 1, *a*. Некоторые методы считывания заряда с фотоприёмных структур приведены в [4].

Не вдаваясь в подробный анализ метрологических характеристик приведённых измерительных цепей, отметим их особенности. Цепь на рис. 1, *a* склонна к самовозбуждению, поэтому в чистом виде её реализовать трудно. Для устойчивой работы необходимо создать компенсирующий нуль передаточной характеристики ОУ путём шунтирования резисторов обратной связи малыми ёмкостями, при этом возникает дополнительный фазовый сдвиг, который требуется учитывать в дальнейшей обработке. Общим для всех приведённых цепей является однозначная связь диапазонов измерения ёмкости и тока (заряда), так что при выборе малого диапазона измерения ёмкости также выбирается малый диапазон измерения заряда. Цепь на рис. 1, *b* допускает нарушение этой зависимости при условии, что будет измеряться комплексный коэффициент передачи тестового сигнала, а передаточная функция цепи измерения ёмкости будет нелинейной. Цепь на рис. 1, *c* обладает наивысшей чувствительностью в связи с отсутствием диссипативных потерь в резисторах, но

она измеряет заряд, из которого получить график тока без потери динамики исследуемых процессов (т. е. без усреднения) можно лишь путём достаточно сложной обработки графика заряда. Суть обработки сводится к переводу графика заряда из табличной формы, в которой на все отсчёты наложен шум, в аналитическую. Выбор варианта измерительной цепи определяется конкретной задачей. В представленном приборе требуется максимальная чувствительность, поэтому реализована цепь-интегратор на рис. 1, с.

**Базовый электронный блок** принимает и обрабатывает сигнал от головки и формирует режимный сигнал на исследуемую структуру. Схема базового блока приведена на рис. 2. Блок выполняет следующие функции:

- измерение ёмкости и заряда;
- формирование режимного сигнала на исследуемую структуру;
- управление прибором на базе программируемой логической матрицы (ПЛМ);
- связь с компьютером по шине USB;
- питание прибора.

Канал измерения ёмкости содержит: полосовой фильтр (ПФ), синхронный детектор (СхД) с частотой 5 МГц и активный фильтр нижних частот второго порядка (ФНЧ-1) с частотой среза 250 кГц. Все указанные блоки усиливают сигнал, их коэффициенты усиления приведены на блок-схеме. Заряд измеряется на постоянном токе. Канал измерения заряда содержит ФНЧ второго порядка (ФНЧ-2), отсекающий ёмкостную составляющую сигнала с выхода головки. Коммутатор каналов (КК), дифференциальный усилитель (ДУ) и АЦП обеспечивают поочерёдное измерение ёмкости и заряда. АЦП имеет частоту дискретиза-

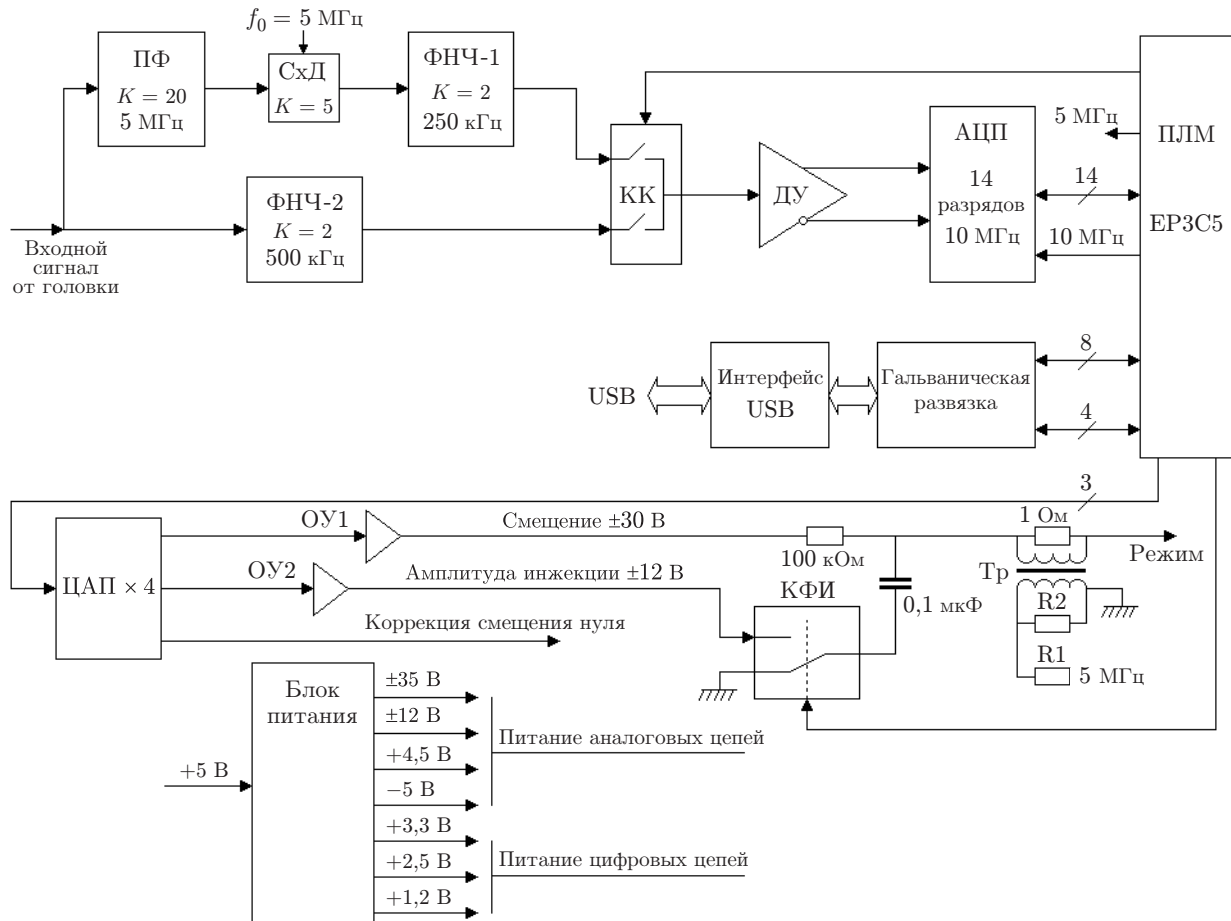


Рис. 2

пии 10 МГц, число разрядов 14. Дифференциальный усилитель согласует несимметричный сигнал с симметричным входом АЦП.

Формирователь режимного сигнала подаёт на электрод исследуемой структуры смесь сигналов: смещения, импульса инжекции, тестового измерения ёмкости с частотой 5 МГц и двойной амплитудой 15 мВ. Он включает 16-разрядный счетверённый ЦАП (ЦАП  $\times$  4), один канал которого совместно с усилителем ОУ1 выдаёт сигнал смещения, второй канал совместно с ОУ2 и ключами формирования импульса (КФИ) инжекции обеспечивает преобразование выходного сигнала ЦАП в импульс инжекции. Ещё один ЦАП применяется для компенсации смещения нуля, возникающего от наброса заряда задним фронтом импульса сброса в головке. Четвёртый ЦАП не используется. Тестовый сигнал измерения ёмкости формируется трансформатором (Тр) из логического сигнала с частотой 5 МГц.

Блок управления прибором выполнен на ПЛМ типа EP3C5-144. Он дешифрует команды компьютера, вырабатывает сигналы управления всеми узлами базового блока и головки, принимает и хранит в собственной оперативной памяти кадр результатов измерений ёмкости и заряда и по окончании кадра, равного по длительности периоду импульсов инжекции, передаёт результаты измерений в компьютер. Максимальный размер кадра достигается при периоде импульсов инжекции  $\geq 400$  мкс и равен 8192 двухбайтовым словам — по 4096 слов на каждый канал измерения. При периоде импульсов инжекции 800 мкс и более запись в память осуществляется с прореживанием таким образом, чтобы число отсчётов не превышало максимального. В компьютере усредняются соседние два—четыре отсчёта, в результате на экран и в файл выводится максимум 1024 выборки по каждому каналу.

В режиме измерения вольт-фарадной характеристики импульс инжекции на структуру не подаётся, а ЦАП смещения формирует медленно меняющееся напряжение развёртки треугольной формы. Интервал развёртки разбивается на 1024 отрезка, на каждом производится четыре измерения, из которых путём усреднения формируется один отсчёт. Перед измерениями на головку подаётся импульс сброса, обнуляющий измерительный интегратор головки. На график выводятся раздельно зависимости  $C(U)$  и  $C(t)$ .

**Особенности построения отдельных блоков прибора.** Поскольку измерение ёмкости осуществляется малым высокочастотным сигналом 5 мВ (среднеквадратичное значение) с частотой 5 МГц, то наиболее сложным для реализации является канал измерения ёмкости. Его состав определяется исходя из компромисса между полосой пропускания, динамическим диапазоном и длительностью «мёртвого» времени после окончания импульса инжекции, недоступного для измерений. Входной полосовой фильтр с центральной частотой 5 МГц эффективно подавляет внеполосные помехи и шумы и защищает последующие цепи от перегрузки. Полосовой фильтр реализован на транзисторном усилителе в каскадном включении с резонансным контуром в нагрузке и имеет полосу 500 кГц, коэффициент усиления 20. Применение резонансного контура позволило минимизировать длительность перегрузки канала, вызванной помехой от заднего фронта импульса сброса головки.

Обычные полупроводниковые ключи плохо работают при частоте переключения  $> 1$  МГц, поэтому синхронный детектор выполнен на широкополосном мультиплексоре LMN 6574, включённом в режим усиления. Мультиплексор совместно с входным фазоинвертором обеспечивает двухполупериодное выпрямление сигнала с коэффициентом усиления 5. Фильтр нижних частот второго порядка с частотой среза 250 кГц отфильтровывает постоянную составляющую сигнала с выхода детектора и дополнительно усиливает сигнал. Общее усиление тракта измерения ёмкости  $\approx 200$ , паразитный фазовый набег не превышает  $\pi/25$ .

При выбранном методе измерения ёмкости и высокой частоте тестового сигнала возникает трудность формирования стабильного средневыпрямленного значения тестового

сигнала. Это обусловлено тем, что входное ёмкостное сопротивление головки в зависимости от измеряемой ёмкости меняется в широких пределах, начиная от  $\sim 30$  Ом при ёмкости 1000 пФ. В данном приборе тестовый сигнал создаётся специальным трансформатором (см. рис. 2), вторичная обмотка которого зашунтирована резистором с сопротивлением 1 Ом. В результате выходное сопротивление формирователя не превышает 1 Ом, чем обеспечивается равномерность средневыпрямленного значения тестового сигнала не более 20 % во всём диапазоне. Остаточная неравномерность компенсируется подбором ёмкостей в головке, которые определяют её коэффициент передачи. Импульс инжекции создаётся ключом КФИ, его функционирование показано на рис. 2.

На рис. 3 представлены виртуальная лицевая панель прибора и график калиброванных сигналов постоянной ёмкости и тока.

#### Технические характеристики прибора:

- 1) диапазоны измерений ёмкости и заряда: 10 пФ и 10 пКл, 100 пФ и 100 пКл, 1000 пФ и 1000 пКл;
- 2) тестовый сигнал измерения ёмкости: среднеквадратичное значение 5 мВ, частота 5 МГц;
- 3) полоса частот и длительность фронта: 250 кГц и 1,5 мкс по каналу ёмкости, 500 кГц и 0,7 мкс по каналу заряда;
- 4) смещение на структуру  $\pm 30$  В, шаг 1 В;
- 5) импульс инжекции: длительность 0,7–5 мкс с шагом 0,1 мкс, амплитуда  $\pm 12$  В с шагом 0,1 В, период 10 мкс–52 мс разбит на 14 диапазонов;
- 6) развёртка треугольной формы, начальное и конечное значения в диапазоне  $\pm 30$  В с шагом 1 В, длительность 10–100 с, шаг 10 с;
- 7) чувствительность (средний квадрат шума): 0,03 пФ и 0,02 пКл на шкале 10 пФ и 10 пКл; 0,13 пФ и 0,04 пКл на шкале 100 пФ и 100 пКл; 0,9 пФ и 0,35 пКл на шкале 1000 пФ и 1000 пКл;

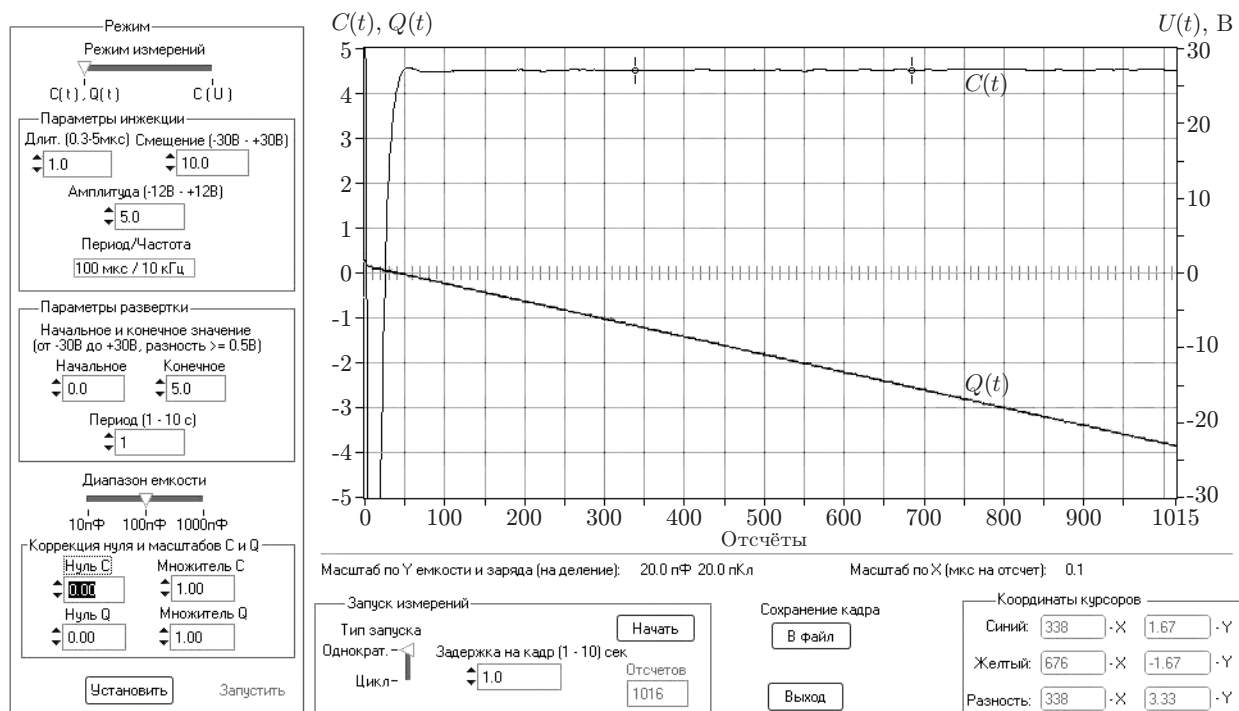


Рис. 3

8) скорость измерений до 10 МГц, максимальное число отсчётов на периоде инъекции 1024;

9) вывод графиков на монитор и запись в файл.

Прибор подключается к шине USB компьютера, питание от сетевого адаптера 5 В × × 0,6 А. Прикладные программы написаны в среде LabWindows/CVI.

**Заключение.** В данной работе показано, что предложенные и реализованные методы построения измерительных цепей и схемы прибора в целом обеспечивают измерение высокочастотных характеристик полупроводниковых структур с высокой чувствительностью и малыми задержками.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базовкин В. М., Половинкин В. Г., Халлиуллин Н. И. Быстродействующее устройство для исследования релаксации емкости, поверхностного потенциала и генерационного тока структур металл—диэлектрик—полупроводник // Приборы и техника эксперимента. 1989. № 2. С. 185–188.
2. Кислов Н. А., Коханчик Г. И. Полуавтоматическая установка для измерения неравновесной емкости полупроводниковых структур // Приборы и техника эксперимента. 1981. № 4. С. 219–222.
3. Пузин И. Б., Хорунжий А. И. Быстродействующий измеритель емкости для спектрометров глубоких уровней // Приборы и техника эксперимента. 1987. № 3. С. 181–183.
4. Ли И. И., Базовкин В. М., Валишева Н. А. и др. Многоэлементные гибридные ИК ФПУ на основе приборов с зарядовой инъекцией. Ч. I. Принципы считывания сигналов // Автометрия. 2007. 43, № 4. С. 25–35.

*Поступила в редакцию 10 февраля 2012 г.*

---