

УДК 621.382.33; 539.21

Контроль дифференциального сопротивления p – n -переходов биполярного транзистора в активном режиме методом импедансной спектроскопии

Н.И. Горбачук¹, Н.А. Поклонский¹, Я.Н. Марочкина¹, С.В. Шпаковский²

¹Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Корженевского, 108, г. Минск 220064, Беларусь

Поступила 01.07.2019

Принята к печати 20.08.2019

Контроль параметров готовых транзисторов и межоперационный контроль при их изготовлении являются необходимыми условия выпуска конкурентоспособных изделий электронной промышленности. Традиционно для контроля биполярных транзисторов используются измерения на постоянном токе и регистрация вольт-фарадных характеристик. Проведение измерений на переменном токе позволит получить дополнительную информацию о параметрах биполярных транзисторов. Цель работы – показать возможности метода импедансной спектроскопии для контроля дифференциального электрического сопротивления p – n -переходов биполярного p – n -транзистора в активном режиме.

Методом импедансной спектроскопии исследован p – n -транзистор КТ814Г производства ОАО «ИНТЕГРАЛ». На переменном токе в интервале частот 20 Hz–30 MHz определены значения дифференциального электрического сопротивления и емкости p – n -переходов база–эмиттера и база–коллектора при постоянных токах базы от 0,8 до 46 μ A.

Результаты работы могут быть использованы при отработке методик выходного контроля дискретных биполярных полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, транзистор, неравновесные электроны и дырки, p – n -переход, область пространственного заряда.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

Адрес для переписки:

Н.И. Горбачук
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Address for correspondence:

N.I. Gorbachuk
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Для цитирования:

Н.И. Горбачук, Н.А. Поклонский, Я.Н. Марочкина, С.В. Шпаковский
Контроль дифференциального сопротивления p – n -переходов
биполярного транзистора в активном режиме методом импедансной
спектроскопии.

Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 253–262.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

For citation:

N.I. Gorbachuk, N.A. Poklonski, Ya.N. Marochkina, S.V. Shpakovski
[Controlling of Differential Resistance of p – n -Junctions of Bipolar
Transistor in Active Mode by Method of Impedance Spectroscopy].
Devices and Methods of Measurements.

2019, vol. 10, no. 3, pp. 253–262 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

Controlling of Differential Resistance of p – n -Junctions of Bipolar Transistor in Active Mode by Method of Impedance Spectroscopy

N.I. Gorbachuk¹, N.A. Poklonski¹, Ya.N. Marochkina¹, S.V. Shpakovski²

¹Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

²JSC “INTEGRAL”,
ul. Kazintsya, 121A, Minsk, 220108 Belarus

Received 01.07.2019

Accepted for publication 20.08.2019

Abstract

Controlling of parameters of manufactured transistors and interoperational controlling during their production are necessary conditions for production of competitive products of electronic industry. Traditionally for controlling of bipolar transistors the direct current measurements and registration of capacity-voltage characteristics are used. Carrying out measurements on alternating current in a wide interval of frequencies (20 Hz–30 MHz) will allow to obtain additional information on parameters of bipolar transistors. The purpose of the work is to show the possibilities of the method of impedance spectroscopy for controlling of differential resistance of p – n -junctions of the bipolar p – n - p -transistor in active mode.

The KT814G p – n - p -transistor manufactured by JSC “INTEGRAL” was studied by the method of impedance spectroscopy. The values of differential electrical resistance and capacitance for base–emitter and base–collector p – n -junctions are defined at direct currents in base from 0.8 to 46 μ A.

The results of the work can be applied to elaboration of techniques of final checking of discrete bipolar semiconductor devices.

Keywords: impedance spectroscopy, transistor, nonequilibrium electrons and holes, p – n -junction, space charge region.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

Адрес для переписки:

Н.И. Горбачук
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Address for correspondence:

N.I. Gorbachuk
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Для цитирования:

Н.И. Горбачук, Н.А. Поклонский, Я.Н. Марочкина, С.В. Шпаковский
Контроль дифференциального сопротивления p – n -переходов
биполярного транзистора в активном режиме методом импедансной
спектроскопии.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 253–262.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

For citation:

N.I. Gorbachuk, N.A. Poklonski, Ya.N. Marochkina, S.V. Shpakovski
[Controlling of Differential Resistance of p – n -Junctions of Bipolar
Transistor in Active Mode by Method of Impedance Spectroscopy].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 253–262 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

Введение

Контроль параметров готовых транзисторов и межоперационный контроль при их изготовлении являются необходимыми условиями выпуска конкурентоспособных изделий электронной промышленности [1]. Традиционно для проверки функционирования готовых биполярных транзисторов используются измерения на постоянном токе (регистрация входных и выходных характеристик, измерение значений напряжений пробоя, регистрация вольт-амперных характеристик (ВАХ) переходов эмиттер–база и база–коллектор) [2]. Для установления распределения примеси используется регистрация вольт-фарадных характеристик (ВФХ) [2, 3].

Важным параметром, определяющим функционирование биполярных транзисторов в электронных устройствах, является напряжение насыщения эмиттер–коллектор [4]. На его значение влияет как активное сопротивление области коллектора, так и эффективность экстракции неравновесных носителей заряда из базы и, соответственно, параметры области пространственного заряда перехода база–коллектор [1, 2, 4]. Перечисленные выше методы позволяют получить лишь косвенные данные о влиянии неравновесных носителей заряда на активное сопротивление области пространственного заряда перехода база–коллектор. Использование импульсных методов, в частности, основанных на наблюдении зависимостей напряжения (тока) от времени при переключении p – n -переходов транзистора с прямого напряжения на обратное, позволяет исследовать переходные процессы и оценить динамику расщепления неравновесных носителей заряда [5], однако не дает возможности проводить мониторинг работы транзистора в активных режимах, близких к используемым в реальных электронных приборах.

Методика импедансной спектроскопии, основанная на проведении измерений в широком интервале частот, традиционно используется в электрохимии и физике гетерогенных систем [6–10]. Применительно к барьерным структурам полупроводниковой электроники она позволяет оценить параметры структурных элементов, не прибегая к нарушению целостности полупроводниковых приборов [10–12], т. е. пригодна для проведения выходного контроля их параметров.

Цель работы – показать возможности метода импедансной спектроскопии для контроля дифференциального электрического сопротивления p – n -переходов биполярного p – n - p -транзистора в активном режиме.

Исследуемые структуры

Исследовались p – n - p -транзисторы КТ814Г производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Транзисторы изготавливались на пластинах (111) монокристаллического кремния p -типа проводимости, выращенного методом Чохральского. Удельное сопротивление кремния при комнатной температуре – $0,005 \Omega \cdot \text{cm}$ (КДБ-0,005). На пластинах наращивался эпитаксиальный слой кремния p -типа с удельным сопротивлением $10 \Omega \cdot \text{cm}$. Толщина эпитаксиального слоя составляла $d \approx 23 \mu\text{m}$. Область базы n -типа формировалась ионной имплантацией фосфора с последующей термической разгонкой ($T = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$). Область эмиттера p^+ -типа создавалась диффузией бора ($T = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$). Финальный термический отжиг проводился при температуре $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Глубина залегания перехода база–коллектор – $x_C \approx 2,8 \mu\text{m}$; глубина перехода эмиттер–база – $x_E \approx 2 \mu\text{m}$. Площадь перехода база–коллектор составляла $\approx 0,6 \text{ mm}^2$, перехода эмиттер–база – $\approx 0,3 \text{ mm}^2$. Схематическое изображение сечения транзистора плоскостью, перпендикулярной плоскости пластины показано на рисунке 1а. Барьерная емкость перехода эмиттер–база транзистора, измеренная в отсутствие постоянного напряжения смещения, составила $C_E = 230 \pm 10 \text{ pF}$, барьерная емкость перехода база–коллектор $C_C = 95 \pm 5 \text{ pF}$. Величина барьерной емкости практически не зависела от частоты в интервале $20 \text{ Hz} - 30 \text{ MHz}$. Омические контакты формировались напылением алюминия толщиной $1,2 \mu\text{m}$. Пластины разделялись на чипы. Площадь чипа составила $1,1 \times 1,1 \text{ mm}^2$. Чипы транзисторов размещались в корпусе КТ-27.

Методика проведения измерений

Для проведения измерений выводы базы и коллектора транзистора соединялись друг с другом через резистор сопротивлением R_1 . Таким образом, исследуемые структуры представляли собой двухполюсник, в котором параллельно переходу база–коллектор подсоединен резистор. Схема двухполюсника приведена на рисунке 1б.

Использование резистора R_1 позволяло устранить неконтролируемое влияние на результаты измерений электрического потенциала на базе. Варьирование сопротивления резистора дает возможность изменять ток базы, что может представлять интерес для дальнейших исследований и развития предлагаемых в работе методов контроля параметров биполярных транзисторов. Использовались резисторы с сопротивлением: 3,3 МΩ, 1,2 МΩ, 370 кΩ, 160 кΩ, 97 кΩ. В диапазоне от $f=20$ Hz до $f=30$ MHz активное сопротивление резисторов практически не зависело от частоты переменного тока, а индуктивность не превышала 10 нН.

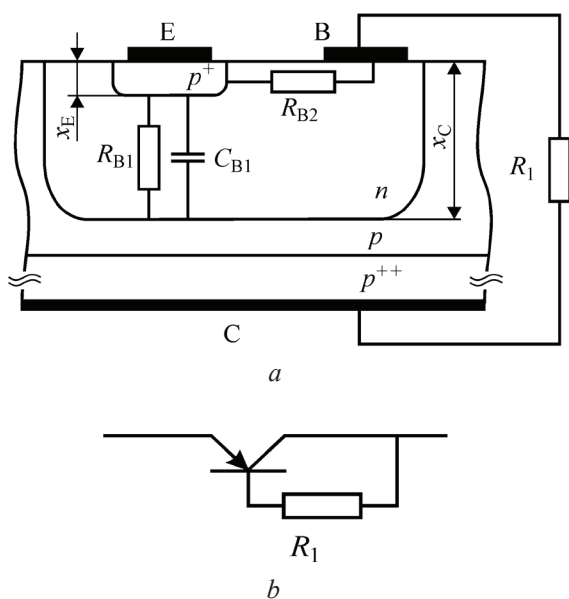


Рисунок 1 – Схематическое изображение сечения исследуемого транзистора плоскостью, перпендикулярной пластине, (a) и электрическая схема двухполюсника (b). Масштаб не соблюден

Figure 1 – Schematic section of studied transistor by a plane, perpendicular to the wafer (a), and circuit diagram of two-terminal device (b). Figure not drawn to scale

Измерение зависимостей действительной Z' и мнимой Z'' частей импеданса $Z = Z' + iZ''$ от частоты f переменного тока проводились на измерителях *LCR Agilent E4980A* и *Agilent 4285A* в диапазоне от 20 Hz до 30 MHz. Амплитуда синусоидального напряжения не превышала 40 мВ. Расчет емкости структуры C проводился по стандартной методике [6]. Все измерения выполнялись при комнатной температуре. Погрешность измерения действительной Z' и мнимой Z'' частей импеданса не превышала 3 %.

Одновременно с переменным измерительным сигналом к структуре прикладывалось постоянное напряжение смещения U_{dc} . В соответствии со схемой, представленной на рисунке 1b, напряжение смещения, прикладываемое к двухполюснику, равно постоянному напряжению коллектор–эмиттер транзистора $U_{dc} = U_{CE}$. Напряжение смещения варьировалось в интервале от 0 до 40 V. При этом величина постоянного тока I_{dc} через структуру изменялась от 0 до 17 mA. Ток I_{dc} двухполюсника равен постоянной составляющей тока эмиттера транзистора: $I_{dc} = I_E$.

Контроль величины постоянной составляющей тока базы I_B для используемых в эксперименте значений напряжения $U_{dc} = U_{CE}$ и сопротивлений резисторов R_1 проводился независимо по стандартной методике [2]. Значения постоянной составляющей тока базы приведены в таблицах 1 и 2. Погрешность измерения I_B не превышала 5 %.

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рисунке 2a представлены зависимости действительной части импеданса Z' от частоты f переменного тока. Номера кривых на рисунке соответствуют номерам в таблице 1. Измерения выполнены для $R_1 = 370$ кΩ. В процессе измерений варьировалось $U_{dc} = U_{CE}$. Ток базы ограничивался резистором R_1 .

Таблица 1/ Table 1

Значения постоянного напряжения эмиттер–коллектор $U_{CE} = U_{dc}$, постоянных токов эмиттера $I_E = I_{dc}$ и базы I_B

Values of emitter–collector direct current voltage $U_{CE} = U_{dc}$ and direct currents of emitter $I_E = I_{dc}$ and base I_B

Номер кривой на рисунках 2, 3 Curve number in Figures 2, 3	$U_{CE} = U_{dc}$, V	$I_E = I_{dc}$, μA	I_B , μA
#1	0,695	49,8	0,53
#2	0,792	76,2	0,75
#3	0,986	128	1,25
#4	1,47	267	2,51
#5	4,87	1300	11,7
#6	19,4	6480	51,2

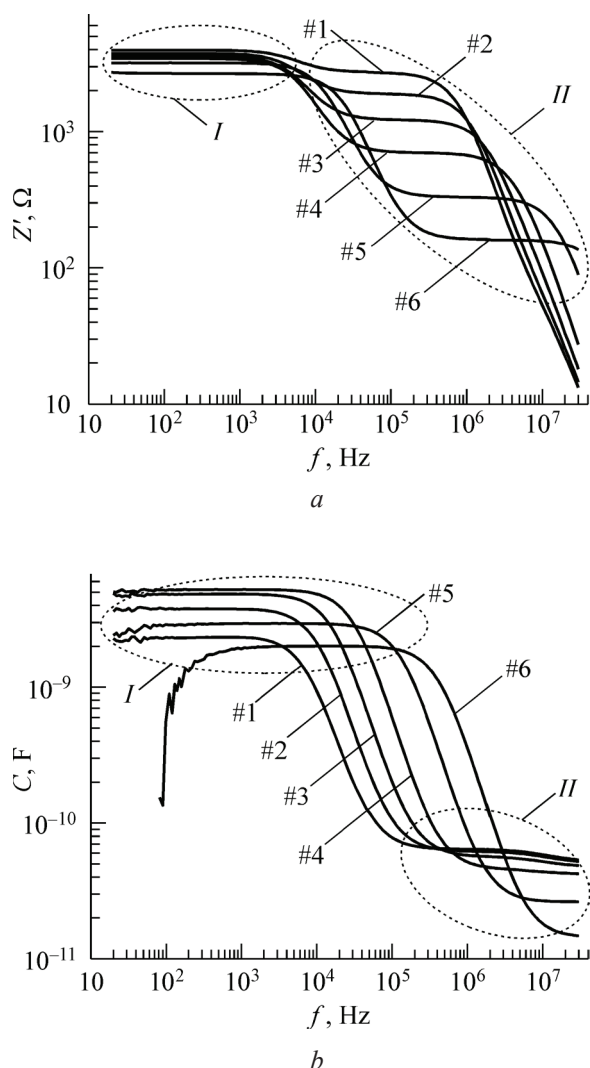


Рисунок 2 – Зависимости действительной части импеданса Z' (a) и емкости C (b) от частоты f переменного тока. Номера кривых соответствуют номерам в таблице 1. $R_1 = 370 \text{ k}\Omega$

Figure 2 – Dependences of real part of impedance Z' (a) and capacitance C (b) on frequency f of alternating current. Curve numbers correspond to numbers in Table 1. $R_1 = 370 \text{ k}\Omega$

Из данных, представленных на рисунке 2a, следует, что в активном режиме (напряжение на переходе база–эмиттер $\geq 0,7 \text{ V}$) зависимости $Z'(f)$ имеют следующие характерные особенности: на каждой из них присутствуют два «плато» (низко- и высокочастотное), в пределах которых Z' практически не зависит от частоты переменного тока, и наблюдаются два участка дисперсионного спада Z' . Участки, в пределах которых нет зависимости Z' от f , на рисунке выделены пунктирным овалом и обозначены I (для низких частот) и II (для высоких). По мере

увеличения напряжения смещения происходит незначительное снижение значений Z' в области I и существенное (до порядка величины) уменьшение Z' в области II . При этом участки дисперсионного спада действительной части импеданса сдвигаются в сторону высоких частот.

На рисунке 2b представлены зависимости емкости C от частоты f переменного тока. Также, как и на зависимостях $Z'(f)$, на зависимостях $C(f)$ наблюдается два «плато», в пределах которых емкость практически не зависит от частоты. «Плато» связаны друг с другом участком дисперсионного спада C . В интервале напряжений $U_{dc} = U_{CE}$ от 0,7 до 1,5 V наблюдается увеличение емкости в области низкочастотного «плато». Для $U_{dc} > 1,5 \text{ V}$ низкочастотные значения C уменьшаются при увеличении U_{dc} . В области высоких частот емкость практически не зависит от U_{dc} в интервале 0,7–1,5 V и снижается при более высоких напряжениях. Участок дисперсионного спада C сдвигается в сторону высоких частот при увеличении U_{dc} .

Основываясь на данных, показанных на рисунке 2, можно построить эквивалентную схему замещения, частотные зависимости импеданса которой были бы максимально близки к наблюдаемым для исследуемой структуры. Согласно [6, 12, 13], наличие нескольких «плато» на зависимостях $Z'(f)$ отвечает присутствию в исследуемых системах объектов с отличающимися временами релаксации $\tau = RC$. Соответственно, эквивалентная схема замещения должна содержать как минимум два конденсатора, а на годографах импеданса должны наблюдаться две полуокружности [6, 12]. На рисунке 3 приведены годографы импеданса для нескольких значений U_{dc} . Четко выделяются две полуокружности, что подтверждает данные рисунка 2. Условие $\omega\tau = 1$ (где $\tau = RC$ – постоянная времени релаксации, $\omega = 2\pi f$) определяет частоту, при которой на годографах наблюдается максимум.

Для нашего случая объектами, обладающими и емкостными, и резистивными свойствами, могут быть переходы (области пространственного заряда) эмиттер–база, база–коллектор, а также электронейтральные области базы и эмиттера. Для p – n -переходов постоянная τ определяется активным (дифференциальным) сопротивлением переходов и барьерной (диффузионной) емкостью. Для электронейтральных областей базы, эмиттера и коллектора в отсутствие инжекции $\tau = \rho\epsilon_0\epsilon_0$,

где ρ – удельное электрическое сопротивление; $\epsilon_r = 11,5$ – относительная диэлектрическая проницаемость кремния; ϵ_0 – электрическая постоянная. Для $\rho = 10 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ имеем $\tau \approx 10 \text{ ps}$, что соответствует частоте $f \approx 0,1 \text{ THz}$. Поэтому в первую очередь на величину импеданса измеряемого двухполюсника оказывают влияние области пространственного заряда переходов эмиттер–база, база–коллектор.

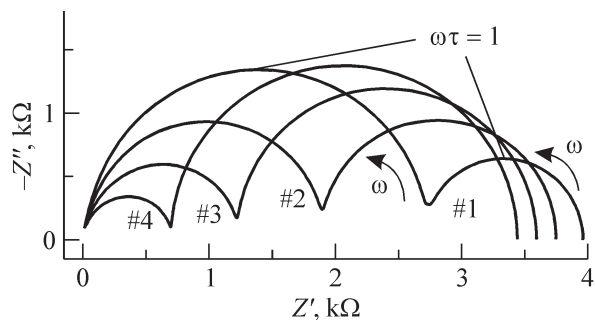


Рисунок 3 – Годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$. Номера кривых соответствуют номерам в таблице 1

Figure 3 – Nyquist diagram for impedance $Z = Z' + iZ''$. Curve numbers correspond to numbers in Table 1

Эквивалентная схема замещения представлена на рисунке 4а. Она включает: R_E , C_E – активное сопротивление и емкость (барьерная и/или диффузионная) перехода эмиттер–база, R_C , C_C – активное сопротивление и емкость (барьерная и/или диффузионная) перехода база–коллектор, R_1 – сопротивление резистора, соединяющего выводы базы и коллектора. В схему введены R_{B1} и C_{B1} , R_{B2} отвечающие сопротивлению и емкости активной и сопротивлению пассивной областей базы. Сопротивление R_{B1} шунтирует последовательно включенные R_{B2} и R_1 . В случае, когда переход эмиттер–база закрыт и токи I_{dc} малы, возможно также шунтирование сопротивлений R_{B2} и R_1 емкостью C_{B1} .

Очевидно [1, 2], что увеличение напряжения смещения U_{dc} от 0 до 0,7 V снижает потенциальный барьер перехода эмиттер–база, вызывает инжекцию неравновесных носителей заряда в базу, что сопровождается уменьшением активного сопротивления перехода эмиттер–база, а также увеличением его емкости C_E . Для измеряемого двухполюсника емкость возрастает от значений барьерной емкости перехода эмиттер–база ($C_E = 230 \pm 10 \text{ pF}$ при $U_{dc} = 0 \text{ V}$) до единиц нанофард. Подобные значения типичны [2] для диффузионной емкости прямосмещенных p – n -переходов примерно с такими же площадями и

уровнями легирования p - и n -областей. Это, а также то, что большая эффективная площадь активной области базы позволяет включенным параллельно R_{B1} и C_{B1} шунтировать резистор R_1 и сопротивление пассивной области базы R_{B2} , дает возможность считать низкочастотные «плато» (см. рисунки 2 а и б) на зависимостях $Z'(f)$ и $C(f)$ соответствующими действительной части импеданса и емкости перехода эмиттер–база.

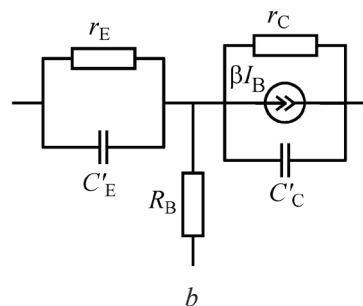
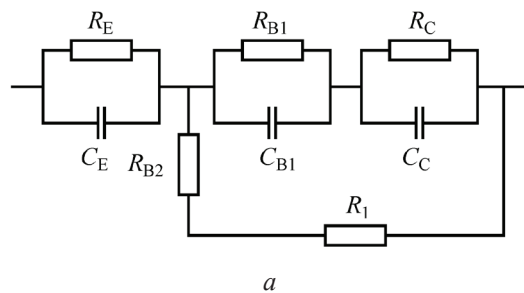


Рисунок 4 – Эквивалентная схема исследуемого биполярного транзистора (а) и простейшая малосигнальная схема транзистора (б)

Figure 4 – Equivalent circuit of studied bipolar transistor (а) and simplest low-signal scheme of transistor (б)

Увеличение тока инжекции дырок в базу при росте U_{dc} приводит к увеличению тока через переход база–коллектор, что эквивалентно уменьшению его активного сопротивления. Значения Z' в области «плато», наблюдаемых на зависимостях $Z'(f)$ в интервале частот 10^5 – 10^7 Hz , также уменьшаются при увеличении U_{dc} . Так как сопротивление коллектора достаточно мало (постоянная времени $\tau \approx 10 \text{ ps}$), то можно считать, что высокочастотное плато соответствует p – n -переходу база–коллектор.

В значения постоянных времен $\tau_E = R_E C_E$ и $\tau_C = R_C C_C$, определяющих максимум на годографах импеданса и граничную частоту дисперсионного спада [6, 12–16] на зависимостях $Z'(f)$ и $C(f)$, вносит вклад не только изменение активных составляющих импеданса, но и емкостных.

В активном режиме при малых постоянных токах емкость прямосмещенного перехода эмиттер–база превышает емкость обратносмещенного перехода коллектор–база. Для прямосмещенного перехода эмиттер–база рост емкости определяется увеличением и барьерной и диффузионной составляющей. Для обратносмещенного перехода база–коллектор наблюдается снижение C (в области высоких частот Π , для $U_{dc} > 1,5$ В) вызвано уменьшением барьерной емкости за счет расширения области пространственного заряда перехода база–коллектор при увеличении U_{dc} .

Наблюдаемые закономерности позволяют провести сопоставление эквивалентной схемы замещения со стандартной малосигнальной моделью транзистора [2] и установить соответствие между их элементами. Простейшая малосигнальная модель транзистора показана на рисунке 4*b*. Она включает: r_E, C'_E – дифференциальное сопротивление и емкость (барьерная и/или диффузионная) перехода эмиттер–база; r_C, C'_C – дифференциальное сопротивление и емкость (барьерная и/или диффузионная) перехода база–коллектор; R_B – сопротивление базы; βI_B – источник тока, соответствующий току экстрагируемых из перехода база–коллектор носителей заряда; $\beta = h_{21e}$ – коэффициент передачи тока базы.

В нашем случае исследуется пассивный двухполустник и рассматриваются частотные зависимости его импеданса, поэтому в эквивалентной схеме замещения (рисунок 4*a*) источника тока нет. Малосигнальная модель содержит две параллельные RC -цепи, при этом можно считать, что $r_E \approx R_E; C_E \approx C'_E$ и $r_C \approx R_C; C_C \approx C'_C$. Сопротивлению базы R_B , входящему в малосигнальную модель, соответствует сумма сопротивлений активной и пассивной частей базы R_{B1} и R_{B2} .

Таким образом данные, представленные на рисунке 2, и рассмотренные модели дают основание полагать что, значения Z' , соответствующие «плато» на зависимостях $Z'(f)$ в области низких частот (область I), приближенно равны дифференциальным сопротивлениям переходов эмиттер–база и база–коллектор: $Z' \approx r_E + r_C$; в области высоких частот (область Π): $Z' \approx r_C$.

Полученные результаты были проверены в дополнительной серии измерений частотных зависимостей импеданса двухполустника. В данной серии поддерживалось постоянное значение $U_{dc} = U_{CE} = 3,00 \pm 0,04$ В. Величина тока базы изменялась с помощью варьирования сопротивления резистора R_1 , соединяющего выводы базы

и коллектора. Значения токов эмиттера $I_E = I_{dc}$ и базы I_B представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Значения постоянных токов эмиттера I_E и базы I_B

Values of direct currents of emitter I_E and base I_B

Номер кривой на рисунках 5, 6	$I_E = I_{dc}, \mu\text{A}$	$I_B, \mu\text{A}$
Curve number in Figures 5 and 6		
#1b	113	0,78
#2b	197	2,10
#3b	702	6,74
#4b	1460	16,3
#5b	2340	24,4
#6b	4650	45,9

На рисунке 5*a* показаны зависимости действительной части импеданса Z' от частоты f переменного тока. Номера кривых на рисунке соответствуют номерам в таблице 2. По значениям Z' в области низких (на рисунке 5*a* выделена пунктирным овалом и обозначена I) и высоких частот (обозначена Π) видно, что увеличение тока базы (при постоянных значениях $U_{CE} = 3,00 \pm 0,04$ В) приводит к одинаково значимым изменениям дифференциального сопротивления переходов эмиттер–база r_E и база–коллектор r_C . Соответствующие изменения претерпевают и годографы импеданса. Для примера на рисунке 6 показаны два годографа, построенные по результатам измерений при токах базы $I_B = 2,10 \mu\text{A}$ (кривая #2b) и $6,74 \mu\text{A}$ (#3b).

На рисунке 5*b* представлены зависимости емкости C двухполустника от частоты f переменного тока. Увеличение тока базы сопровождается немонотонными изменениями емкости прямосмещенного перехода база–эмиттер. Возможно, это связано со сложной геометрией базы и особенностями накопления заряда в ней. Отметим, что для значений $I_B \geq 45 \mu\text{A}$ при частотах $f < 50$ Нз наблюдался положительный угол сдвига фаз между колебаниями тока и напряжения, что характерно для импеданса индуктивного типа. Причиной этого может быть недостаточная эффективность экстракции носителей заряда из базовой области. На рисунке 5*b* это проявляется в наличии низкочастотного участка роста C .

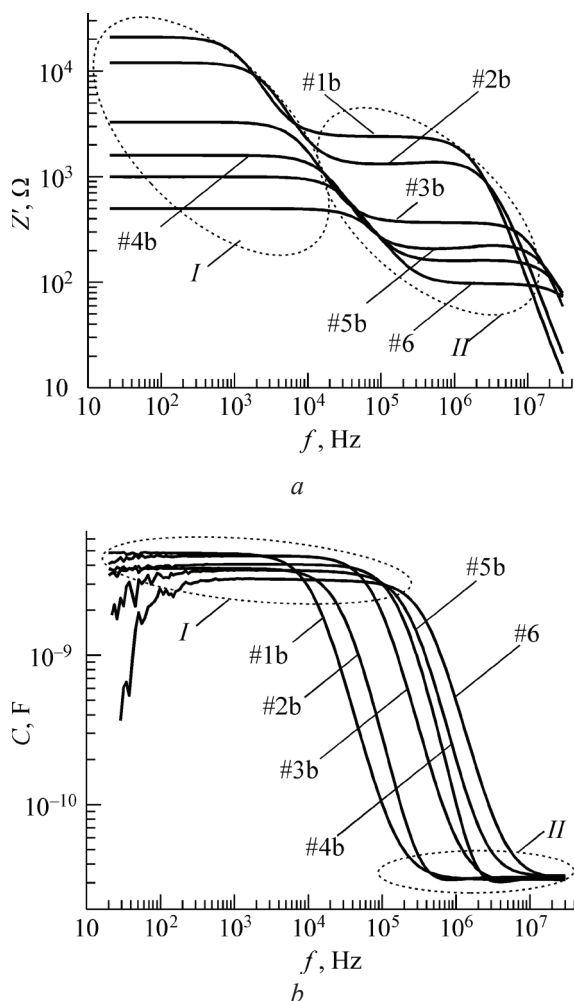


Рисунок 5 – Зависимости действительной части импеданса $Z'(a)$ и емкости $C(b)$ от частоты f переменного тока. Номера кривых соответствуют номерам в таблице 2

Figure 5 – Dependences of real part of impedance $Z'(a)$ and capacitance $C(b)$ on frequency f of alternating current. Curve numbers correspond to numbers in Table 2

В отличие от данных, представленных на рисунке 2*b*, емкость двухполюсника в области высоких частот (II) практически не зависит от тока базы. Это может рассматриваться как дополнительное подтверждение правомерности отождествления C двухполюсника в области высоких частот с емкостью перехода база–коллектор. Переход смещен в обратном направлении, его барьерная емкость существенно меньше емкости перехода эмиттер–база. При малых токах она определяется разностью потенциалов на коллекторном переходе, которая в случае поддержания на заданном уровне напряжения коллектор эмиттер $U_{dc} = U_{CE} \approx 3$ В, слабо зависит от тока базы.

В таблице 3 приведены значения дифференциальных сопротивлений и емкостей p – n -переходов, полученные по модели двухполюсника (рисунок 1*b*) из анализа результатов дополнительной серии измерений (см. рисунок 5).

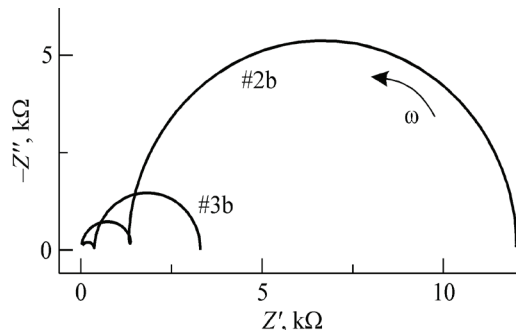


Рисунок 6 – Годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$. Номера кривых соответствуют номерам в таблице 2

Figure 6 – Nyquist diagrams for impedance $Z = Z' + iZ''$. Curve numbers correspond to numbers in Table 2

Таблица 3/ Table 3

Значения дифференциального сопротивления переходов эмиттер–база r_E , база–коллектор r_C и соответствующие емкости C_E и C_C двухполюсника (согласно рисунку 1)

Values of differential resistance of junctions for emitter–base r_E , base–collector r_C and corresponding capacitances C_E and C_C of two-terminal device (according to Figure 1)

I_B , μA	r_E , k Ω	r_C , Ω	C_E , nF	C_C , pF
0,78	$18,6 \pm 0,6$	2410 ± 70	$4,81 \pm 0,24$	$31,7 \pm 1,6$
2,10	$10,7 \pm 0,4$	1330 ± 40	$3,81 \pm 0,20$	$32,5 \pm 1,6$
6,74	$2,90 \pm 0,1$	368 ± 10	$4,61 \pm 0,23$	$32,3 \pm 1,6$
16,3	$1,38 \pm 0,05$	210 ± 6	$4,10 \pm 0,21$	$32,5 \pm 1,6$
24,4	$0,84 \pm 0,03$	161 ± 5	$3,71 \pm 0,19$	$33,4 \pm 1,7$
45,9	$0,400 \pm 0,015$	97 ± 3	$3,22 \pm 0,16$	$32,6 \pm 1,6$

Расчеты выполнены с учетом того, что на эквивалентной схеме замещения RC -цепи эмиттера ($R_E C_E$), базы ($R_{B1} C_{B1}$) и коллектора ($R_C C_C$) соединены последовательно. Тогда в области низкочастотного плато (область I): $Z' \approx R_E + R_{B1} + R_C$. Так как $R_{B1} \ll R_E$ и $R_{B1} \ll R_C$, то: $Z' \approx R_E + R_C \approx r_E + r_C$. В области II: $Z' \approx R_C \approx r_C$. Для емкостей: $C \approx C_E \approx C'_E$ – в области низкочастотного плато и $C \approx C_C \approx C'_C$ – для высоких частот (область II). Закономерности, прослеживаемые по данным таблицы 3 и на рисунках 5, 6, согласуются с существующими представлениями

о физике работы биполярных транзисторов [1, 2] и подтверждают результаты, представленные на рисунках 2, 3. Итак, метод импедансной спектроскопии может использоваться для контроля параметров p - n -переходов биполярного p - n - p -транзистора в активном режиме.

Заключение

Продемонстрированы возможности метода импедансной спектроскопии для определения значений дифференциальных электрических сопротивлений r_E , r_C и емкостей C_E , C_C для p - n -переходов эмиттер–база и база–коллектор биполярного p - n - p -транзистора в активном режиме за один цикл измерений в интервале частот от 20 Hz до 30 MHz. Показана возможность измерения r_E , r_C и C_E , C_C при заданных значениях постоянного тока базы и напряжения на переходе коллектор–эмиттер.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» и «Физматтех».

Список использованных источников

1. Ng, K.K. Complete guide to semiconductor devices / K.K. Ng. – New York : Wiley, 2002. – xxiv+740 p.
2. Sze, S.M. Semiconductor devices: Physics and technology / S.M. Sze, M.K. Lee. – New York : Wiley, 2012. – x+578 p.
3. Nicollian, E.H. The Si-SiO₂ interface – electrical properties as determined by metal-insulator-silicon conductance technique / E.H. Nicollian, A. Goetzberger // Bell Syst. Tech. J. – 1967. – Vol. 46, no. 6. – P. 1055–1133. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1967.tb01727.x
4. Baumann, P. Parameterextraktion bei Halbleiterbauelementen. Simulation mit PSPICE / P. Baumann. – Wiesbaden : Springer Vieweg, 2019. – x+191 p. DOI: 10.1007/978-3-658-26574-8
5. Poklonski, N.A. Kinetics of reverse resistance recovery of silicon diodes: The role of the distance the metallurgical p^+ - n -junction–defect layer formed by 250 MeV krypton implantation / N.A. Poklonski [et al.] // Physica B. – 2009. – Vol. 404, no. 23–24. – P. 4667–4670. DOI: 10.1016/j.physb.2009.08.129
6. Impedance spectroscopy: Theory experiment, and applications / Ed. by E. Barsoukov, J.R. Macdonald. – Hoboken : Wiley, 2018. – xviii+528 p. DOI: 10.1002/9781119381860
7. Cho, C.-H. Characterization of electronic structure of silicon nanocrystals in silicon nitride by capacitance

spectroscopy / C.-H. Cho [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2010. – Vol. 96, no. 22. – P. 223110 (3 pp.).

DOI: 10.1063/1.3431572

8. Поклонский, Н.А. Электропроводность композиционных материалов на основе мелкодисперсного кремния вблизи перехода диэлектрик–металл / Н.А. Поклонский [и др.] // Неорганические материалы. – 2004. – Т. 40, № 11. – С. 1293–1298.

9. Winterhalter, J. Analysis of admittance data: Comparison of a parametric and a nonparametric method / J. Winterhalter [et al.] // J. Comput. Phys. – 1999. – Vol. 153, no. 1. – P. 139–159.

DOI: 10.1006/jcph.1999.6269

10. Lauwaert, J. A simple correction method for series resistance and inductance on solar cell admittance spectroscopy / J. Lauwaert [et al.] // Sol. Energ. Mat. Sol. C. – 2010. – Vol. 94, no. 6. – P. 966–970.

DOI: 10.1016/j.solmat.2010.01.025

11. Poklonski, N.A. Impedance and barrier capacitance of silicon diodes implanted with high-energy Xe ions / N.A. Poklonski [et al.] // Microelectron. Reliab. – 2010. – Vol. 50, no. 6. – P. 813–820.

DOI: 10.1016/j.microrel.2010.02.007

12. Поклонский, Н.А. Эквивалентная схема замещения кремниевых диодов, облученных высокими флюенсами электронов / Н.А. Поклонский [и др.] // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, № 10. – С. 74–82.

13. Волков, А.С. Анализ экспериментальных результатов по модели Гавриляка–Негами в диэлектрической спектроскопии / А.С. Волков [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124, № 2. – С. 206–209.

14. Kowal, J. Model parameterization of nonlinear devices using impedance spectroscopy / J. Kowal, D. Hente, D.U. Sauer // IEEE T. Instrum. Meas. – 2009. – Vol. 58, no. 7. – P. 2343–2350.

DOI: 10.1109/TIM.2009.2013927

15. Kavasoglu, A.S. Simulation for capacitance correction from Nyquist plot of complex impedance–voltage characteristics / A.S. Kavasoglu, N. Kavasoglu, S. Oktik // Solid-State Electron. – 2008. – Vol. 52, no. 6. – P. 990–996. DOI: 10.1016/j.sse.2008.02.004

16. Campbell, D. Evaluation of possible equivalent circuits for the description of the CV characteristics of heavily irradiated Si diodes / D. Campbell, A. Chilingarov, T. Sloan // Nucl. Instrum. Meth. A. – 2005. – Vol. 552, no. 1–2. – P. 152–157.

DOI: 10.1016/j.nima.2005.06.024

Acknowledgments

The work is supported by the Belarusian National Research Programs “Photonics, opto- and microelectronics” and “Fizmattekh”.

References

1. Ng K.K. Complete Guide to Semiconductor Devices. New York, Wiley, 2002, xxiv+740 p.
2. Sze S.M., Lee M.K. Semiconductor Devices: Physics and Technology, New York, Wiley, 2012, x+578 p.
3. Nicollian E.H., Goetzberger A. The Si-SiO₂ interface – electrical properties as determined by metal-insulator-silicon conductance technique. *Bell Syst. Tech. J.*, 1967, vol. 46, no. 6, pp. 1055–1133.
DOI: 10.1002/j.1538-7305.1967.tb01727.x
4. Baumann P. Parameterextraktion bei Halbleiterbauelementen. Simulation mit PSPICE, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2019, x+191 p.
DOI: 10.1007/978-3-658-26574-8
5. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Skuratov V.A., Wieck A. Kinetics of reverse resistance recovery of silicon diodes: The role of the distance the metallurgical p^+n -junction–defect layer formed by 250 MeV krypton implantation. *Physica B*, 2009, vol. 404, no. 23–24, pp. 4667–4670.
DOI: 10.1016/j.physb.2009.08.129
6. Impedance Spectroscopy: Theory Experiment, and Applications, ed. by E. Barsoukov, J.R. Macdonald. Hoboken, Wiley, 2018, xviii+528 p.
DOI: 10.1002/9781119381860
7. Cho C.-H., Kim B.-H., Kim S.-K., Park S.-J. Characterization of electronic structure of silicon nanocrystals in silicon nitride by capacitance spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 96, no. 22, pp. 223110 (3 pp.).
DOI: 10.1063/1.3431572
8. Poklonskii N.A., Gorbachuk N.I., Pototskii I.V., Trofimchuk D.A. Electrical conductivity of composite materials based on fine-particle silicon near the metal–insulator transition. *Inorg. Mater.*, 2004, vol. 40, no. 11, pp. 1133–1137.
DOI: 10.1023/B:INMA.0000048209.93137.12
9. Winterhalter J., Ebling D.G., Maier D., Honerkamp J. Analysis of admittance data: Comparison of a parametric and a nonparametric method. *J. Comput. Phys.*, 1999, vol. 153, no. 1, pp. 139–159.
DOI: 10.1006/jcph.1999.6269
10. Lauwaert J., Decock K., Khelifi S., Burgelman M. A simple correction method for series resistance and inductance on solar cell admittance spectroscopy. *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, 2010, vol. 94, no. 6, pp. 966–970.
DOI: 10.1016/j.solmat.2010.01.025
11. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Lastovskii S.B., Skuratov V.A., Wieck A., Markevich V.P. Impedance and barrier capacitance of silicon diodes im-plantated with high-energy Xe ions. *Microelectron. Reliab.*, 2010, vol. 50, no. 6, pp. 813–820. **DOI:** 10.1016/j.microrel.2010.02.007
12. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Wieck A. Equivalent circuit of silicon diodes subjected to high-fluence electron irradiation. *Tech. Phys.*, 2010, vol. 55, no. 10, pp. 1463–1471.
DOI: 10.1134/S1063784210100117
13. Volkov A.S., Kuposov G.D., Perfil'ev R.O., Tyagunin A.V. Analysis of experimental results by the Havriliak–Negami model in dielectric spectroscopy. *Opt. Spectrosc.*, 2018, vol. 124, no. 2, pp. 202–205.
DOI: 10.1134/S0030400X18020200
14. Kowal J., Hente D., Sauer D.U. Model parameterization of nonlinear devices using impedance spectroscopy. *IEEE T. Instrum. Meas.*, 2009, vol. 58, no. 7, pp. 2343–2350.
DOI: 10.1109/TIM.2009.2013927
15. Kavasoglu A.S., Kavasoglu N., Oktik S. Simulation for capacitance correction from Nyquist plot of complex impedance–voltage characteristics. *Solid-State Electron.*, 2008, vol. 52, no. 6, pp. 990–996.
DOI: 10.1016/j.sse.2008.02.004
16. Campbell D., Chilingarov A., Sloan T. Evaluation of possible equivalent circuits for the description of the CV characteristics of heavily irradiated Si diodes. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2005, vol. 552, no. 1–2, pp. 152–157.
DOI: 10.1016/j.nima.2005.06.024