

УДК 621.382.33; 539.21

Влияние экстракции дырок из базовой области кремниевого $p-n-p$ -транзистора на его реактивный импеданс

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. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь

Поступила 18.10.2019

Принята к печати 29.11.2019

Транзисторные структуры являются базовыми элементами интегральной схемотехники и часто используются для создания не только собственно транзисторов, но и диодов, резисторов, конденсаторов. Определение механизма возникновения импеданса индуктивного типа в полупроводниковых структурах является актуальной задачей, решение которой создаст предпосылки к разработке твердотельных аналогов катушек индуктивности. Цель работы – установить влияние экстракции неравновесных носителей заряда из базовой области на реактивный импеданс биполярного $p-n-p$ -транзистора.

Методом импедансной спектроскопии в интервале частот 20 Hz–30 MHz исследованы структуры на базе $p-n-p$ -транзисторов КТ814Г производства ОАО «ИНТЕГРАЛ». Показано, что в транзисторных структурах возможно наблюдение «эффекта отрицательной ёмкости» (импеданс индуктивного типа). Установлено, что наиболее вероятной причиной возникновения импеданса индуктивного типа является накопление нескомпенсированного заряда дырок в базе, а на величину индуктивного импеданса влияет как эффективность инжекции в переходе база–эмиттер, так и эффективность экстракции в переходе база–коллектор.

Результаты работы могут быть использованы при разработке технологий формирования элементов интегральных микросхем на основе кремния с импедансом индуктивного типа.

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

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

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.
Влияние экстракции дырок из базовой области кремниевого
 $p-n-p$ -транзистора на его реактивный импеданс.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 322–330.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

For citation:

N.I. Gorbachuk, N.A. Poklonski, Ya.N. Marochkina, S.V. Shpakovski.
[Effect of Hole Extraction from the Base Region of a Silicon
 $p-n-p$ Transistor on its Reactive Impedance].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 322–330 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

Effect of Hole Extraction from the Base Region of a Silicon $p-n-p$ Transistor on its Reactive Impedance

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

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

²JSC “INTEGRAL”,
Kazintsa str., 121 A, Minsk 220108, Belarus

Received 18.10.2019

Accepted for publication 29.11.2019

Abstract

Transistor structures are the basic elements of integrated circuitry and are often used to create not only transistors themselves, but also diodes, resistors, and capacitors. Determining the mechanism of the occurrence of inductive type impedance in semiconductor structures is an urgent task, the solution of which will create the prerequisites for the development of solid-state analogs of inductors. The purpose of the work is to establish the effect of extraction of nonequilibrium charge carriers from the base region on the reactive impedance of a bipolar $p-n-p$ transistor.

Using impedance spectroscopy in the frequency range 20 Hz–30 MHz, the structures based on $p-n-p$ transistors KT814G manufactured by JSC “INTEGRAL” were studied. It is shown that in the transistor structures it is possible to observe the “effect of negative capacitance” (inductive type impedance). It is established that the most probable cause of the inductive type impedance is the accumulation of uncompensated charge of holes in the base, the value of inductive impedance is influenced by both the injection efficiency in the base–emitter junction and the extraction efficiency in the base–collector junction.

The results can be applied in the elaboration of technologies for the formation of elements of silicon based integrated circuits with an impedance of inductive type.

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

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

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.
Влияние экстракции дырок из базовой области кремниевого
 $p-n-p$ -транзистора на его реактивный импеданс.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 322–330.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

For citation:

N.I. Gorbachuk, N.A. Poklonski, Ya.N. Marochkina, S.V. Shpakovski.
[Effect of Hole Extraction from the Base Region of a Silicon
 $p-n-p$ Transistor on its Reactive Impedance].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 322–330 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

Введение

Элементы с индуктивным импедансом достаточно часто используются в схемотехнике аналоговых интегральных микросхем [1]. Основными способами формирования элемента цепи с индуктивным импедансом является создание плёночных металлических индуктивностей (спиралей) [2] и имитация индуктивной нагрузки с помощью операционных усилителей [3], однако и то и другое приводит к нерациональному использованию площади на микросхеме. В связи с этим представляет интерес так называемый «эффект отрицательной ёмкости» (вид представления реактивной проводимости индуктивного типа) [4].

Отрицательная ёмкость наблюдалась в различных полупроводниковых структурах, таких как халькогенидные плёнки [5], полуизолирующий поликристаллический кремний [6], многослойные гетероструктуры [7, 8], границы раздела металл–полупроводник [9]. Физические механизмы, приводящие к возникновению отрицательной ёмкости в различных полупроводниковых структурах, существенно различаются. Предполагается, что в диодах с p – n -переходом эффект отрицательной ёмкости обусловлен модуляцией проводимости электронейтральной области неосновными носителями заряда при больших амплитудах переменного тока [10]. В [11] обнаружена зависимость вещественной и мнимой частей импеданса диодов как от постоянной составляющей тока, так и от частоты сигнала. Было установлено [11], что при некоторой плотности тока характер реактивного сопротивления (мнимой части импеданса) диода меняется с ёмкостного на индуктивный. В работе [12] высказано предположение, что основную роль в формировании импеданса индуктивного типа для диодов, содержащих точечные дефекты и их комплексы, играют центры прилипания, аккумулирующие носители заряда в течение времени порядка полупериода колебаний тока в цепи. Аналогичный эффект наблюдался в кремниевых фотодиодах, облученных нейтронами [13].

Ранее нами в работе [14] отмечено немонотонное изменение ёмкости прямосмещённого перехода база–эмиттер. Для значений $I_B \geq 45 \mu\text{A}$ при частотах $f < 50 \text{ Hz}$ наблюдался положительный угол сдвига фаз между колебаниями тока и напряжения, что характерно для импеданса индуктивного типа. Вероятной причиной данного

эффекта могут быть особенности накопления носителей заряда в базе, в том числе и недостаточная эффективность их экстракции.

Транзисторные структуры являются базовыми элементами интегральной схемотехники и часто используются для создания не только собственно транзисторов, но и диодов, резисторов, конденсаторов [15]. Поэтому представляет интерес исследование особенностей формирования импеданса в индуктивного типа (отрицательной ёмкости) в транзисторных структурах для оценки перспектив применения их в качестве твердотельных аналогов катушек индуктивности.

Цель работы – установить влияние экстракции неравновесных носителей заряда из базовой области на реактивный импеданс p – n -переходов биполярного p – n - p -транзистора.

Методика эксперимента

Исследовались p – n - p -транзисторы КТ814Г производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» — управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Технология изготовления транзисторов приведена в работе [14].

Для проведения измерений выводы базы и коллектора транзистора соединялись друг с другом через резистор сопротивлением R_1 так, как это показано на рисунке 1. Соответственно, исследуемые структуры представляли собой двухполюсник, в котором параллельно переходу база–коллектор подсоединен резистор. Варьирование сопротивления резистора позволяло изменять ток базы. Использовались резисторы с сопротивлением: 1,2 МΩ, 370 кΩ, 160 кΩ, 100 кΩ, 50 кΩ. В диапазоне частот от $f = 20 \text{ Hz}$ до 30 МГц активное сопротивление резисторов практически не зависело от частоты переменного тока, а индуктивность не превышала 10 нН.

Измерения зависимостей действительной Z' и мнимой Z'' частей импеданса $Z = Z' + iZ''$ от частоты $f = \omega/2\pi$ переменного тока проводились на измерителях *LCR Agilent E4980A* и *Agilent 4285A* в диапазоне от 20 Hz до 30 МГц. Амплитуда синусоидального напряжения не превышала 40 мV. Все измерения проводились при комнатной температуре. Погрешность измерения действительной Z' и мнимой Z'' частей импеданса не превышала 3 %. Графики зависимостей действительной и мнимой частей импеданса от частоты f переменного тока и годографы импеданса строились по стандартной методике [16]. Для удобства

сравнения с результатами измерений барьерных полупроводниковых структур и композиционных материалов, обладающих, как правило, реактивным импедансом ёмкостного типа [17, 18] при построении графиков значения Z'' умножались на -1 .

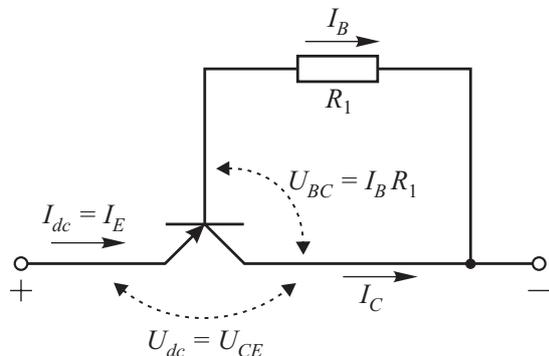


Рисунок 1 – Электрическая схема двухполюсника

Figure 1 – Circuit diagram of two-terminal device

Выполнялись три серии измерений.

1) В первой серии измерений сопротивление резистора оставалось постоянным $R_1 = 370 \text{ k}\Omega$. Одновременно с синусоидальным измерительным сигналом к структуре прикладывалось постоянное напряжение смещения U_{dc} . В соответствии со схемой, представленной на рисунке 1, напряжение смещения U_{dc} равно постоянному напряжению коллектор–эмиттер транзистора $U_{dc} = U_{CE}$. Напряжение смещения варьировалось в интервале от 0 до 0,7 В. При этом величина постоянного тока I_{dc} через структуру изменялась от 0 до 50 μA . Ток I_{dc} двухполюсника равен постоянной составляющей тока эмиттера транзистора: $I_{dc} = I_E = I_B + I_C$, где I_B и I_C – постоянные составляющие токов базы и коллектора. Дополнительный контроль I_B и I_E проводился независимо по известной методике [19]. Значения постоянной составляющей токов базы и эмиттера приведены в таблице 1. Погрешность измерения I_B и I_E в экспериментах данной серии и последующих измерениях не превышала 5 %.

2) В ходе второй серии измерений на двухполюснике поддерживалось постоянное значение напряжения $U_{dc} = U_{CE} = 0,600 \pm 0,005 \text{ V}$. Ток базы варьировался в интервале от 100 нА до 1,20 μA , за счет использования различных резисторов R_1 : 1,2 М Ω , 370 к Ω , 160 к Ω , 100 к Ω , 50 к Ω . При этом величина постоянного тока $I_{dc} = I_E$ через структуру изменялась от 10 до 150 μA , а напряжение на коллекторном переходе $U_{BC} = I_B R_1$ (если пренебречь падением напряжения на активной области

базы) – от 48 до 130 мВ. Контроль величины постоянной составляющей тока базы I_B проводился аналогично первой серии измерений. Значения постоянной составляющей тока базы и тока эмиттера приведены в таблице 2.

Таблица 1 / Table 1

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

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

Curve number in Figures 2 and 3	$U_{CE} = U_{dc}, \text{ V}$	$I_E = I_{dc}, \mu\text{A}$	$I_B, \text{ nA}$
#1	0	0	0
#2	$0,400 \pm 0,008$	$0,46 \pm 0,02$	10 ± 1
#3	$0,420 \pm 0,008$	$1,27 \pm 0,05$	25 ± 1
#4	$0,450 \pm 0,009$	$2,40 \pm 0,10$	50 ± 2
#5	$0,500 \pm 0,010$	$7,70 \pm 0,31$	110 ± 5
#6	$0,600 \pm 0,012$	$26,6 \pm 1,1$	300 ± 15
#7	$0,700 \pm 0,014$	$49,8 \pm 2,0$	530 ± 25

Таблица 2 / Table 2

Значения постоянного постоянных токов эмиттера $I_E = I_{dc}$ и базы I_B во второй серии измерений

Values of direct currents of emitter $I_E = I_{dc}$ and base I_B in the second series of measurements

Curve number in Figure 4	$I_E = I_{dc}, \mu\text{A}$	$I_B, \text{ nA}$
#1	$8,43 \pm 0,25$	110 ± 5
#2	$14,3 \pm 0,4$	170 ± 8
#3	$26,6 \pm 0,8$	300 ± 15
#4	$64,4 \pm 1,9$	680 ± 34
#5	110 ± 3	1110 ± 56

3) В третьей серии измерений поддерживалось постоянное значение тока через структуру $I_{dc} = I_E = 27,0 \pm 0,8 \mu\text{A}$. Ток базы при этом оставался на уровне $I_B = 300 \pm 30 \text{ nA}$. Контроль тока базы проводился так же, как и в первых двух сериях измерений. В эксперименте использовались различные резисторы R_1 : 1,2 М Ω , 370 к Ω , 160 к Ω , 100 к Ω , 50 к Ω . Вследствие этого напря-

жение $U_{CE} = U_{dc}$ изменялось в интервале от 0,5 до 0,7 В. Значения постоянного напряжения U_{CE} приведены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Значения постоянного напряжения эмиттер–коллектор $U_{CE} = U_{dc}$ и база–коллектор $U_{BC} = I_B R_1$ в третьей серии измерений

Values of direct current voltage of emitter–collector $U_{CE} = U_{dc}$ and base–collector $U_{BC} = I_B R_1$ in the third series of measurements

Curve number in Figure 5	$U_{CE} = U_{dc}$, V	$U_{BC} = I_B R_1$, V
#1	$0,700 \pm 0,005$	$0,360 \pm 0,040$
#2	$0,597 \pm 0,005$	$0,110 \pm 0,010$
#3	$0,550 \pm 0,005$	$0,048 \pm 0,005$
#4	$0,531 \pm 0,005$	$0,030 \pm 0,004$
#5	$0,513 \pm 0,005$	$0,015 \pm 0,002$

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рисунке 2а представлены зависимости действительной части импеданса Z' от частоты f переменного тока. Номера кривых соответствуют таблице 1. В процессе измерений варьировалось $U_{dc} = U_{CE}$. Ток базы ограничивался резистором $R_1 = 370 \text{ k}\Omega$.

В том случае, когда транзистор находится в активном режиме $U_{dc} \geq 0,7 \text{ V}$, на зависимостях действительной части импеданса от частоты присутствуют два плато (т. е. участки со слабой зависимостью $Z'(f)$). Одно – при $f < 103 \text{ Hz}$, второе – в интервале частот 103–106 Hz. Особенности зависимостей $Z'(f)$ и $-Z''(f)$ для структур $U_{dc} \geq 0,7 \text{ V}$ проанализированы в [14]. В данной работе рассматриваются поведение частотных зависимостей импеданса при $U_{dc} < 0,7 \text{ V}$. Из данных, представленных на рисунке 2а, следует, что при напряжениях смещения $0,7 \text{ V} > U_{dc} > 0 \text{ V}$ на зависимостях $Z'(f)$ наблюдается низкочастотное плато (при $f < 103 \text{ Hz}$) и постепенно «вырождающееся» высокочастотное (при $f > 106 \text{ Hz}$). На рисунке плато выделены пунктирными овалами и обозначены I и III соответственно. Характерной особенностью кривых 2–6 является наличие участков роста Z' по мере увеличения f . На рисунке 2а они выделены и обозначены как область II. Увеличение Z' при росте f возможно в том случае, когда в системе (цепи) присутствует [16] элемент с индуктивным ($Z'' > 0$) импедансом.

На рисунке 2b показаны зависимости мнимой части импеданса от частоты. На зависимостях четко видны участки, соответствующие импедансу индуктивного типа, для которых $-Z'' < 0$, т. е. мнимая часть импеданса Z'' положительна.

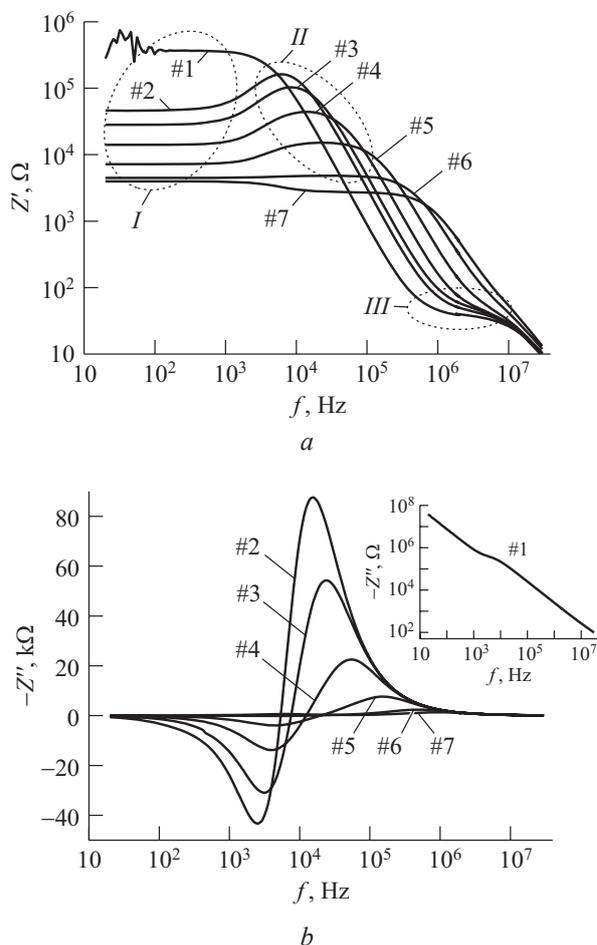


Рисунок 2 – Зависимости действительной $Z'(a)$ и мнимой $Z''(b)$ частей импеданса от частоты f переменного тока. Номера кривых соответствуют таблице 1; $R_1 = 370 \text{ k}\Omega$

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

На рисунке 3 представлены годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$. Для значений напряжения смещения $0,7 \text{ V} > U_{dc} > 0 \text{ V}$ годографы имеют характерный вид «спиралей» [16], что дополнительно иллюстрирует смену знака реактивного импеданса исследуемых структур при увеличении частоты в рассматриваемом интервале $U_{dc} = U_{CE}$. При переходе в активный режим работы биполярного транзистора вид годографов (кривая #7) соответствует данным работы [14].

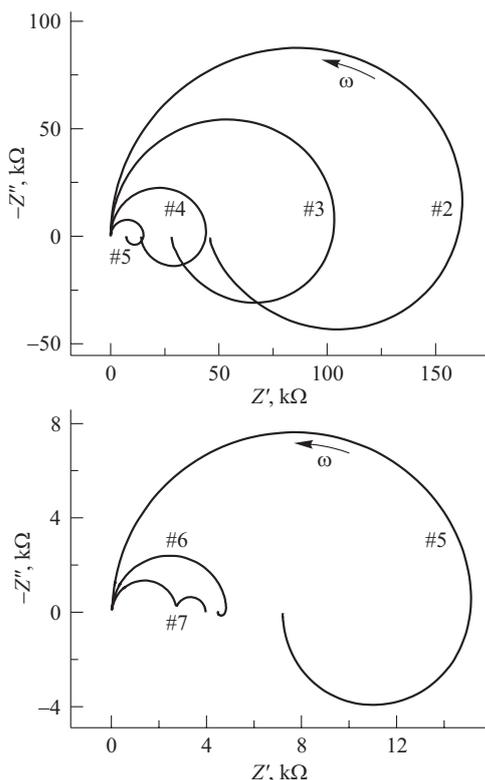


Рисунок 3 – Годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$. Номера кривых соответствуют таблице 1 и рисунку 2; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота

Figure 3 – Nyquist diagram for impedance $Z = Z' + iZ''$. Curve numbers correspond to Table 1 and Figure 2; $\omega = 2\pi f$ is the angular frequency

Наличие импеданса индуктивного типа может быть связано как с геометрией базы, так и с особенностями накопления заряда в ней. Геометрия базы может влиять на величину индуктивного импеданса в том случае, когда изменение тока через активную область базы вызывает изменение магнитного потока. Фактически это индуктивность в «стандартном» понимании данного термина. Величина такой индуктивности не превышает сотен наногенри [12]. Если бы главную роль в формировании индуктивного импеданса исследуемых структур играла именно она, то в рассматриваемом диапазоне частот положительный угол сдвига фаз φ между колебаниями тока и напряжения не превышал бы единиц градусов. В наших же экспериментах φ достигало значений 25° и более. Поэтому наиболее вероятной причиной возникновения импеданса индуктивного типа являются особенности накопления заряда в базе.

На величину заряда, накопленного в базе, влияют как эффективность инжекции в переходе

база–эмиттер, так и эффективность экстракции в переходе база–коллектор. В первой серии экспериментов изменялся как уровень инжекции неравновесных носителей в базу через эмиттерный переход, так и напряжение на коллекторном переходе. Причем большая часть прикладываемой к структуре разности потенциалов приходилась на переход эмиттер–база. Для проверки влияния инжекции на формирование импеданса индуктивного типа проводилась вторая серия измерений, в ходе которых на двухполюснике поддерживалось постоянное значение напряжения $U_{dc} = U_{CE} = 0,600 \pm 0,005$ В. Ток базы варьировался в интервале от 100 нА до 1,20 мА. На рисунке 4а показаны годографы импеданса исследуемых структур. Номера кривых на рисунке соответствуют таблице 2. Видно, что индуктивный импеданс появляется только при токах базы $I_B \geq 170$ нА.

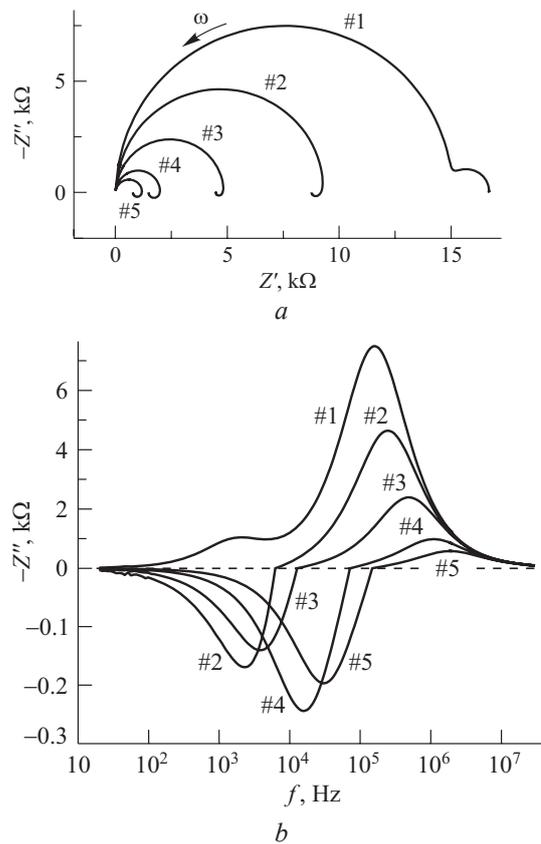


Рисунок 4 – Годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$ (а) и зависимости мнимой части импеданса Z'' от частоты f переменного тока (б). Номера кривых соответствуют таблице 2

Figure 4 – Nyquist diagram for impedance $Z = Z' + iZ''$ (a) and dependences of imaginary part of impedance Z'' on frequency f of alternating current (b). Curve numbers correspond to Table 2

На рисунке 4*b* показаны зависимости мнимой части импеданса от частоты. Минимумы (и «точки» смены знака мнимой части импеданса) на зависимостях $-Z''(f)$ сдвигаются в сторону высоких частот по мере роста тока инжекции. Таким образом, сопоставление результатов эксперимента, представленных на рисунках 2 и 3, с данными, приведёнными на рисунке 4, подтверждает предположение о влиянии на величину индуктивного импеданса тока инжекции в переходе база–эмиттер. Отметим, что в случае меньших значений $U_{dc} = U_{CE}$ импеданс индуктивного типа наблюдался и при более низких токах базы. Например, для $U_{dc} = U_{CE} = 0,45$ было достаточно $I_B = 50$ нА (см. рисунки 2–4).

Для проверки влияния эффективности экстракции носителей заряда через коллекторный переход в третьей серии измерений поддерживалось постоянное значение тока через структуру $I_{dc} = I_E = 27,0 \pm 0,5$ мкА. Ток базы при этом оставался на уровне $I_B = 300 \pm 30$ нА, а напряжение $U_{CE} = U_{dc}$ изменялось в интервале от 0,513 до 0,700 В.

На рисунке 5*a* показаны годографы импеданса исследуемых структур. Номера кривых на рисунке соответствуют таблице 3. Видно, что индуктивный импеданс появляется только при $U_{dc} = U_{CE} \leq 0,6$ В. Как следует из данных, представленных на рисунке 5*b*, при снижении U_{CE} величина импеданса индуктивного типа увеличивается. Также наблюдается сдвиг минимума на зависимостях $-Z''(f)$ в сторону высоких частот.

Интервал напряжений U_{CE} , рассматриваемый в настоящей работе, соответствует случаю, когда переход база–коллектор закрыт. Инжекция в базу со стороны коллектора мала. Даже при $U_{BC} = I_B R_1 = 0,015 \pm 0,002$ В (зависимость 5 на рисунке 4) высота энергетического барьера достаточна для того, чтобы ей пренебречь. Рост $U_{BC} = I_B R_1$ приводит к увеличению высоты энергетического барьера коллекторного перехода, что естественным образом повышает эффективность экстракции носителей заряда, инжектированных в базу через эмиттерный переход. Соответственно, на рисунке 5 наблюдается трансформация зависимостей $-Z''(f)$. Если для кривых #5 характерно чёткое проявление импеданса индуктивного типа, то при $U_{BC} = I_B R_1 = 0,360 \pm 0,040$ В (кривые #1) на зависимостях $-Z''(f)$ (и на годографах) отсутствуют участки, соответствующие импедансу индуктивного типа.

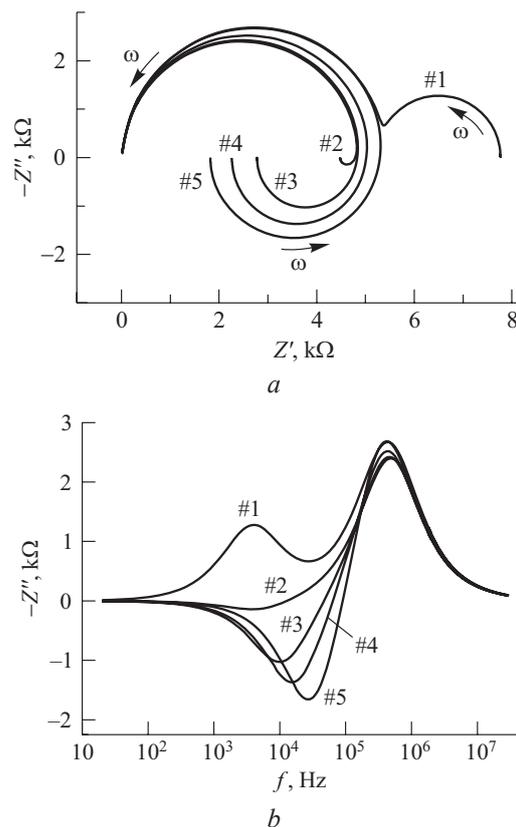


Рисунок 5 – Годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$ (а) и зависимости мнимой Z'' части импеданса от частоты f переменного тока (б). Номера кривых соответствуют таблице 3

Figure 5 – Nyquist diagram for impedance $Z = Z' + iZ''$ (a) and dependences of imaginary part of impedance Z'' on frequency f of alternating current (b). Curve numbers correspond to Table 3

Таким образом, можно утверждать что эффективность экстракции носителей заряда через коллекторный переход также оказывает существенное влияние на формирование импеданса индуктивного типа в транзисторных структурах.

Заключение

В транзисторных структурах $p-n-p$ -типа наблюдался эффект отрицательной ёмкости (импеданс индуктивного типа). Установлено, что наиболее вероятной причиной возникновения импеданса индуктивного типа является накопление заряда в базовой области транзистора. Показано, что на индуктивный импеданс влияет не только величина тока инжекции дырок (неосновных носителей заряда) через переход база–эмиттер, но и эффективность экстракции дырок через переход база–коллектор.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований «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. Burghartz, J.N. Integrated circuit inductor: пат. 5884990 США, МПК6 H01F 5/00 / J.N. Burghartz [et al.]; заявитель International Business Machines Corporation; заявл. 14.10.1997; опубл. 23.03.1999.

3. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: в 2 т. / У. Титце, К. Шенк. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832+942 с.

4. Пенин, Н.А. Отрицательная емкость в полупроводниковых структурах / Н.А. Пенин // Физика и техника полупроводников. – 1996. – Т. 30, № 4. – С. 626–634.

5. Гибадатов, И.Ю. Индуктивный импеданс в гетроструктурах металл – халькогенидный стеклообразный полупроводник – кристаллический полупроводник / И.Ю. Гибадатов, А.С. Глебов // Письма в Журнал технической физики. – 1990. – Т. 16, № 1. – С. 22–25.

6. Butcher, K.S.A. An instrumental solution to the phenomenon of negative capacitance in semiconductors / K.S.A. Butcher, T.L. Tansley, D. Alexiev // Solid-State Electronics. – 1996. – Vol. 39, № 3. – P. 333–336.
DOI: 10.1016/0038-1101(95)00143-3

7. Болтаев, А.П. Отрицательная емкость в гетроструктурах Ni–TiO₂–p–Si / А.П. Болтаев [и др.] // Микроэлектроника. – 1995. – Т. 24, № 4. – С. 291–294.

8. Болтаев, А.П. Эффекты накопления заряда и отрицательная емкость в гетроструктурах на основе кремния / А.П. Болтаев [и др.] // Известия РАН. – 1999. – Т. 63, № 2. – С. 312–316.

9. Parravicini, G.B. Low-frequency negative capacitance effect in system of metallic nanoparticles embedded in dielectric matrix / G.B. Parravicini [et al.] // Applied Physics Letters. – 2004. – Vol. 85, № 2. – P. 302–304. DOI: 10.1063/1.1772872

10. Ershov, M. Negative capacitance effect in semiconductor devices / M. Ershov [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1998. – Vol. 45, № 10. – P. 2196–2206. DOI: 10.1109/16.725254

11. Jones, B.K. Negative capacitance effects in semiconductor diodes / B.K. Jones, J. Santana, M. McPherson // Solid State Communications. – 1998. – Vol. 107, № 2. – P. 47–50.
DOI: 10.1016/S0038-1098(98)00162-8

12. Поклонский, Н.А. Отрицательная емкость (импеданс индуктивного типа) кремниевых p^+ – n -переходов, облученных быстрыми электронами / Н.А. Поклонский [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, № 7. – С. 824–828.

DOI: 10.1134/S1063782606070128

13. McPherson, M. Capacitive effects in neutron-irradiated silicon diodes / M. McPherson // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2002. – Vol. 488, № 1–2. – P. 100–109.

DOI: 10.1016/S0168-9002(02)00480-1

14. Горбачук, Н.И. Контроль дифференциального сопротивления p – n -переходов биполярного транзистора в активном режиме методом импедансной спектроскопии / Н.И. Горбачук [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 253–262.

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

15. ULSI Technology / Ed. by C.Y. Chang, S.M. Sze. – New York: McGraw-Hill, 1996. – xxvi+726 p.

16. Impedance spectroscopy: Theory experiment, and applications / Ed. by E. Barsoukov, J.R. Macdonald. – Hoboken: Wiley, 2018. – xviii+528 p.

DOI: 10.1002/9781119381860

17. 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.

18. Poklonski, N.A. Impedance and barrier capacitance of silicon diodes implanted with high-energy Xe ions / N.A. Poklonski [et al.] // Microelectronics Reliability. – 2010. – Vol. 50, № 6. – P. 813–820.
DOI: 10.1016/j.microrel.2010.02.007

19. Sze, S.M. Semiconductor devices: Physics and technology / S.M. Sze, M.K. Lee. – New York: Wiley, 2012. – x+578 p.

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. Burghartz J.N., Edelstein D.C., Jahnes C.V., Uzoh C.E. Integrated circuit inductor, Patent USA 5884990, Int. Cl. 6 H01F 5/00, Assignee: International Business Machines Corporation, Filed: 14.10.1997, Date of Patent: Mar. 23, 1999.

3. Tietze U., Shenk Ch. Halbleiter-Schaltungstechnik. Berlin, Springer, 2002, xxvi+1606 p.

4. Penin N.A. Negative capacitance in semiconductor structures. *Semiconductors*, 1996, vol. 30, no. 4, pp. 340–343.
5. Gibadatov I.Yu., Glebov A.S. [Inductive impedance in metal – chalcogenide glass-like semi-conductor – crystal semiconductor structures]. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* [Soviet Technical Physics Letters], 1990, vol. 16, no. 1, pp. 22–25 (in Russian).
6. Butcher K.S.A., Tansley T.L., Alexiev D. An instrumental solution to the phenomenon of negative capacitance in semiconductors. *Solid-State Electronics*, 1996, vol. 39, no. 3, pp. 333–336.
DOI: 10.1016/0038-1101(95)00143-3
7. Boltaev A.P., Burbaev T.M., Kalyuzhnaya G.A., Kurbatov V.A., Penin N.A. Negative capacitance in Ni–TiO₂–*p*-Si heterostructures. *Russian Microelectronics*, 1995, vol. 24, no. 4, pp. 255–258.
8. Boltaev A.P., Burbaev T.M., Kurbatov V.A., Rzaev M.M., Penin N.A., Sibeldin N.N. [Charge accumulation effects and negative capacitance in heterostructures based on silicon]. *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya*, 1999, vol. 63, no. 2, pp. 312–316 (in Russian).
9. Parravicini G.B., Stella A., Ungureanu M.C., Kofman R. Low-frequency negative capacitance effect in system of metallic nanoparticles embedded in dielectric matrix. *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 85, no. 2, pp. 302–304. **DOI:** 10.1063/1.1772872
10. Ershov M., Liu H.C., Li L., Buchanan M., Wasilewski Z.R., Jonscher A.K. Negative capacitance effect in semiconductor devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, vol. 45, no. 10. – P. 2196–2206.
DOI: 10.1109/16.725254
11. Jones B.K., Santana J., McPherson M. Negative capacitance effects in semiconductor diodes. *Solid State Communications*, 1998, vol. 107, no. 2, pp. 47–50.
DOI: 10.1016/S0038-1098(98)00162-8
12. Poklonski N.A., Shpakovski S.V., Gorbachuk N.I., Lastovskii S.B. Negative capacitance (impedance of the inductive type) of silicon *p*⁺–*n* junctions irradiated with fast electrons. *Semiconductors*, 2006, vol. 40, no. 7, pp. 803–807.
DOI: 10.1134/S1063782606070128
13. McPherson M. Capacitive effects in neutron-irradiated silicon diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, vol. 488, no. 1–2, pp. 100–109. **DOI:** 10.1016/S0168-9002(02)00480-1
14. Gorbachuk N.I., Poklonski N.A., Marochkina Ya.N., Shpakovski S.V. [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
15. ULSI Technology, ed. by C.Y. Chang, S.M. Sze. New York, McGraw-Hill, 1996, xxvi+726 p.
16. Impedance Spectroscopy: Theory Experiment, and Applications, ed. by E. Barsoukov, J.R. Macdonald. Hoboken, Wiley, 2018, xviii+528 p.
DOI: 10.1002/9781119381860
17. Poklonskii N.A., Gorbachuk N.I., Pototskii I.V., Trofimchuk D.A. Electrical conductivity of composite materials based on fineparticle silicon near the metal–insulator transition. *Inorganic Materials*, 2004, vol. 40, no 11, pp. 1133–1137.
DOI: 10.1023/B:INMA.0000048209.93137.12
18. 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 implanted with high-energy Xe ions. *Microelectronics Reliability*, 2010, vol. 50, no. 6, pp. 813–820. **DOI:** 10.1016/j.microrel.2010.02.007
19. Sze S.M., Lee M.K. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, New York, Wiley, 2012, x+578 p.