



# ЗАВИСИМОСТЬ РЕАКТИВНОГО ИМПЕДАНСА ОТ ИНЖЕКЦИИ И ЭКСТРАКЦИИ ДЫРОК В КРЕМНИЕВОМ p-n-p-ТРАНЗИСТОРЕ



Я.Н. Марочкина

Белорусский государственный университет  
Физический факультет  
Кафедра физики полупроводников и наноэлектроники

## Цель работы

- Установить влияние экстракции неравновесных носителей заряда из базовой области на реактивный импеданс биполярного p-n-p-транзистора.
- Показать, что в транзисторных структурах наблюдается «эффект отрицательной ёмкости»

## Актуальность

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

## Исследуемый объект

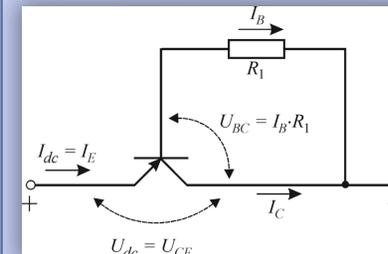


Рисунок 1. Электрическая схема двухполюсника

Структура в виде двухполюсника состоящая из p-n-p-транзистора КТ814Г и резистора соединяющего вывод базы и коллектора транзистора.

## Результаты эксперимента и их обсуждение

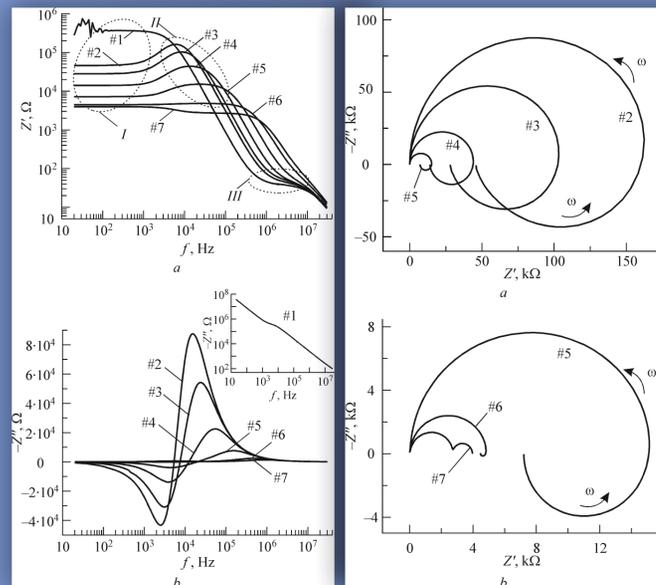


Рисунок 2. Зависимости действительной  $Z'$  (a) и мнимой  $Z''$  (b) частей импеданса от частоты  $f$  переменного тока.  $R1 = 370 \text{ k}\Omega$  и  $U_{dc} = U_{ce}$

Рисунок 3. Годографы импеданса,  $\omega = 2\pi f$  - угловая частота

На рисунке 2а, видно, 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  $f > 106 \text{ Hz}$ ) (плато выделены пунктирными овалами I и III). На рисунке 2а характерной особенностью кривых 2-6 является наличие участков роста  $Z'$  по мере увеличения  $f$  (область II). Следовательно, в цепи присутствует элемент с индуктивным импедансом ( $Z'' > 0$ ). На рисунке 2б можно наблюдать участки, соответствующие импедансу индуктивного типа, для которых мнимая часть импеданса положительна.

На рисунке 3 годографы имеют характерный вид «спиралей», что дополнительно иллюстрирует смену знака реактивного импеданса исследуемых структур при увеличении частоты. Наиболее вероятной причиной возникновения импеданса индуктивного типа являются особенности накопления заряда в базе. Поскольку в наших экспериментах  $\phi$  достигало значений  $25^\circ$  и более. А на величину заряда, накопленного в базе, влияют как эффективность инжекции в переходе база-эмиттер, так и эффективность экстракции в переходе база-коллектор. На двухполюснике поддерживалось постоянное значение напряжения  $U_{dc} = U_{ce} = 0,600 \pm 0,005 \text{ V}$ . Ток базы варьировался в интервале от  $100 \text{ nA}$  до  $1,20 \mu\text{A}$ . На рисунке 4а видно, что индуктивный импеданс появляется при  $I_b \geq 170 \text{ nA}$  (с кривой #2). На рисунке 4б минимумы (и «точки» смены знака мнимой части импеданса) на зависимостях  $-Z''(f)$  сдвигаются в сторону высоких частот по мере роста тока инжекции. Сопоставив рисунок 4 с рисунками 2-3, мы подтвердили предположение о влиянии на величину индуктивного импеданса тока инжекции в переходе база-эмиттер.

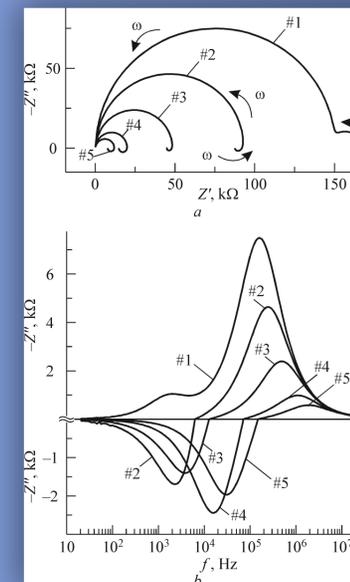


Рисунок 4. Годографы импеданса (a) и зависимости мнимой части импеданса  $Z''$  от частоты  $f$  переменного тока (b).

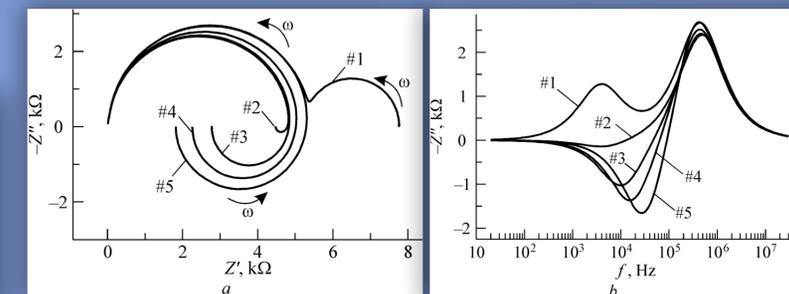


Рисунок 5. Годографы импеданса (a) и зависимости мнимой  $Z''$  части импеданса от частоты  $f$  переменного тока (b).

Далее поддерживалось постоянное значение тока через структуру  $I_{dc} = I_e = 27,0 \pm 0,5 \mu\text{A}$ .  $I_b = 300 \pm 30 \text{ nA}$ , а  $U_{ce} = U_{dc}$  изменялось в интервале от  $0,513$  до  $0,700 \text{ V}$ . На рисунке 5а видно, что индуктивный импеданс появляется только при  $U_{dc} = U_{ce} \leq 0,6 \text{ V}$ . Как следует из данных, представленных на рисунке 5б, при снижении  $U_{ce}$  величина импеданса индуктивного типа увеличивается. Также наблюдается сдвиг минимума на зависимостях  $-Z''(f)$  в сторону высоких частот. 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 четкое проявление импеданса индуктивного типа, то при  $U_{bc} = I_b R_1 = 0,360 \pm 0,040 \text{ V}$  (кривые #1) на зависимостях  $-Z''(f)$  (и на годографе ах) отсутствуют участки, соответствующие импедансу индуктивного типа. 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 действительно 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 неосновных носителей заряда через переход база-эмиттер, но и эффективность экстракции дырок через переход база-коллектор.

Научный руководитель  
доцент, канд. физ.-мат. наук  
Горбачук Николай Иванович

МИНСК, 2020

