

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

1. Краткие теоретические сведения

Полевыми (униполярными) транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых электрический ток создается основными носителями заряда под действием продольного электрического поля, а управление током (модуляция) осуществляется поперечным электрическим полем, создаваемым на управляющем электроде.

Область полупроводникового прибора, по которой протекает управляемый ток, называется **каналом**. Электрод, через который носители заряда втекают в канал, называется **истоком**, а электрод, через который они вытекают из канала, – **стоком**. Электрод, используемый для управления площадью поперечного сечения канала (током канала), называется **затвором**. Затвор должен быть электрически изолирован от канала. В зависимости от способа изоляции различают:

- ПТ с управляющим р-n-переходом;
- ПТ с изолированным затвором или транзисторы металл – диэлектрик – полупроводник (МДП-транзисторы).

В настоящее время широко применяются **полевые транзисторы с барьером Шотки** (ПТШ), в которых в качестве управляющего перехода используется барьер Шотки. **Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов**, использующие свойства гетероперехода, работают в диапазоне СВЧ.

Структура полевого транзистора с управляющим р-n-переходом и каналом n-типа приведена на рис. 7.1, а. На подложке из р-кремния создается тонкий слой полупроводника n-типа, выполняющий функции канала, т. е. токопроводящей области, сопротивление которой регулируется электрическим полем. Нижний р-n-переход изолирует канал от подложки и задает начальную толщину канала. Обычно выводы истока и подложки соединяют.

Принцип действия ПТ с управляющим р-n-переходом основан на увеличении сопротивления активного слоя (канала) путем расширения р-n-перехода при подаче на него обратного напряжения. Для эффективного управления сопротивлением канала полупроводник, образующий область затвора, легирован сильнее (p^+), чем области канала (n) (см. рис. 7.1), при этом расширение обедненного слоя происходит в сторону канала. Наиболее характерной чертой полевых транзисторов является высокое входное сопротивление, т. к. ток затвора мал, поэтому они управляются напряжением. При $U_{ЗИ} = 0$ сопротивление канала минимально $R_{к0} = \rho l / hw$, где ρ – удельное сопротивление полупроводника канала; l , w – длина и ширина

канала соответственно, h – расстояние между металлургическими границами n -слоя канала. Чем больше обратное напряжение на затворе $U_{ЗИ}$, тем шире p - n -переходы, тоньше канал и выше его сопротивление. При некотором напряжении на затворе, называемом **напряжением отсечки** $U_{ЗИ\text{отс}}$, канал полностью перекрывается обедненными слоями. Сопротивление канала становится очень большим и реально достигает значений десятки – сотни мегаом.

При подаче на сток положительного напряжения $U_{СИ}$ (рис. 7.1, б) в канале возникает ток I_C и напряжение в любом сечении канала $U_{КИ}(x)$, измеренное относительно истока, является функцией расстояния до истока x за счет конечного значения удельного сопротивления канала. Поэтому и

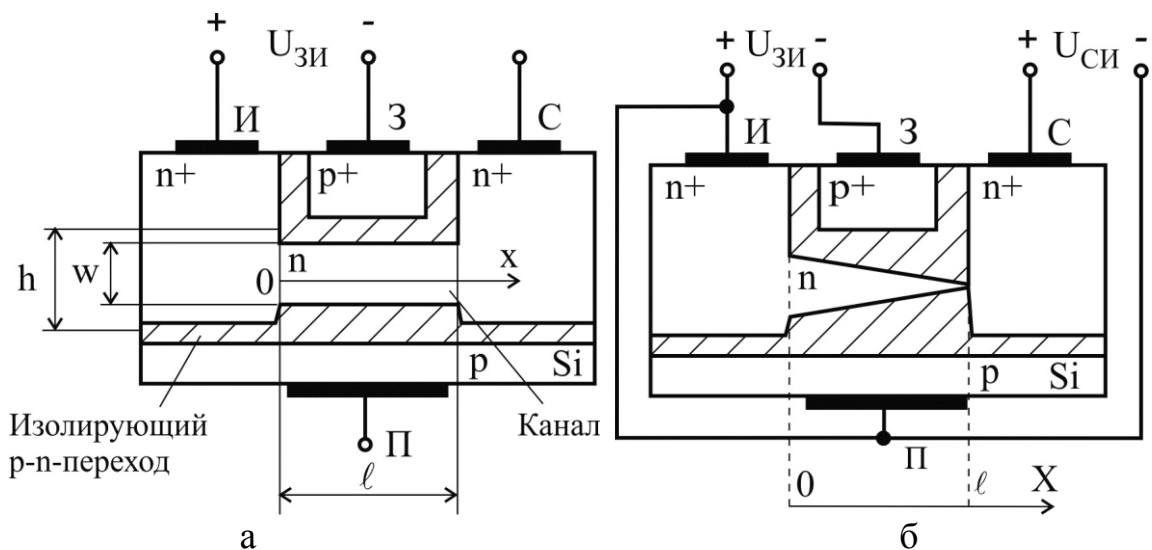


Рис. 7.1. Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом:

а – структура транзистора ; б – транзистор в режиме отсечки

И – исток, З – затвор, С – сток, П – подложка

напряжение между любым сечением канала и затвором $U_{КЗ}(x)$ является функцией расстояния до истока – x .

Минимальным является напряжение $U_{КЗ}(x)$ при $x = 0$ $U_{КЗ}(0) = U_{ИЗ} = -U_{ЗИ}$, а максимальным – $U_{КЗ}(x)$ при $x = \ell$ $U_{КЗ}(\ell) = U_{СЗ} = U_{СИ} + U_{ИЗ}$. Причем для управляющего перехода эти напряжения являются запирающими, поэтому ширина перехода возрастает от истока к стоку, а ширина канала уменьшается. При некотором напряжении сток – исток, называемом **напряжением насыщения** $U_{СИ} = U_{СИ\text{нас}}$, канал вблизи стока сужается до минимальной толщины (см. рис. 7.1, б). Сопротивление канала при этом $R_{к\text{нас}} \neq \infty$ больше начального $R_{к0}$. Под действием напряжения насыщения через канал протекает ток максимальной величины:

$$I_{C\text{max}} = U_{СИ\text{нас}} / R_{к\text{нас}} \quad (7.1).$$

Транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы). Характерное отличие полевых транзисторов с изолированным затвором состоит в том, что у них между металлическим затвором и областью полупроводника находится слой диэлектрика – двуокись кремния SiO_2 . Поэтому полевые транзисторы с изолированным затвором называются МДП (металл – диэлектрик – полупроводник) или МОП (металл – окисел – полупроводник). Выпускаются МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналом.

В основе действия МДП-транзистора лежит **эффект поля**, представляющий собой изменение величины и типа электропроводности полупроводника вблизи его границы с диэлектриком под действием приложенного напряжения. Рассмотрим МДП-структуру, изображенную на рис. 7.2, а и содержащую полупроводник р-типа. При подаче на затвор положительного напряжения, а на подложку отрицательного дырки выталкиваются полем с поверхности вглубь полупроводника и образуется слой с уменьшенной их концентраций. Такой режим называется **режимом обеднения**. Электроны в этом случае из глубины полупроводника притягиваются к диэлектрику и при некотором напряжении у поверхности полупроводника р-типа концентрация электронов превышает концентрацию дырок, т. е. появляется тонкий слой полупроводника с электропроводностью n-типа. Говорят, что произошла **инверсия электропроводности полупроводника**. Между областями истока и стока n-типа появилась (**индуцировалась**) область канала с тем же типом проводимости. Изменяя напряжения на затворе, можно изменять концентрацию электронов в канале, а значит, и его сопротивление. Если увеличивать положительное напряжение на затворе, концентрация электронов в канале увеличивается. Такой режим называется **режимом обогащения**.

В **МДП-транзисторе с индуцированным каналом** n-типа (см. рис. 7.2, а) при напряжении на затворе $U_{ЗИ} = 0$ канал отсутствует и при подаче $U_{СИ} > 0$ ток стока будет равен нулю. Если увеличивать положительное напряжение на затворе, то, начиная с некоторого значения, называемого пороговым $U_{ЗИ\text{ пор}}$, происходит инверсия электропроводности подложки и образуется канал (см. рис. 7.2, а). В справочниках обычно в качестве порогового приводится значение $U_{ЗИ}$, при котором ток стока $I_C = 10 \text{ мкА}$. При $U_{ЗИ} > U_{ЗИ\text{ пор}}$ в МДП-транзисторах с каналом n-типа увеличение напряжения на затворе приводит к уменьшению сопротивления канала за счет обогащения его электронами, ток стока при этом увеличивается. МДП-транзистор с индуцированным каналом работает в режиме обогащения.

В **МДП-транзисторе со встроенным каналом** n-типа, структура которого приведена на рис. 7.2, б, уже при отсутствии внешних напряжений

имеется канал, соединяющий области истока и стока. Поэтому при $U_{ЗИ} = 0$ и $U_{СИ} > 0$ протекает ток стока. При увеличении положительного напряжения на затворе область канала обогащается электронами и ток стока возрастает. При увеличении отрицательного напряжения на затворе канал обедняется электронами и ток стока уменьшается. МДП-транзисторы со встроенным каналом работают в режимах обогащения и обеднения.

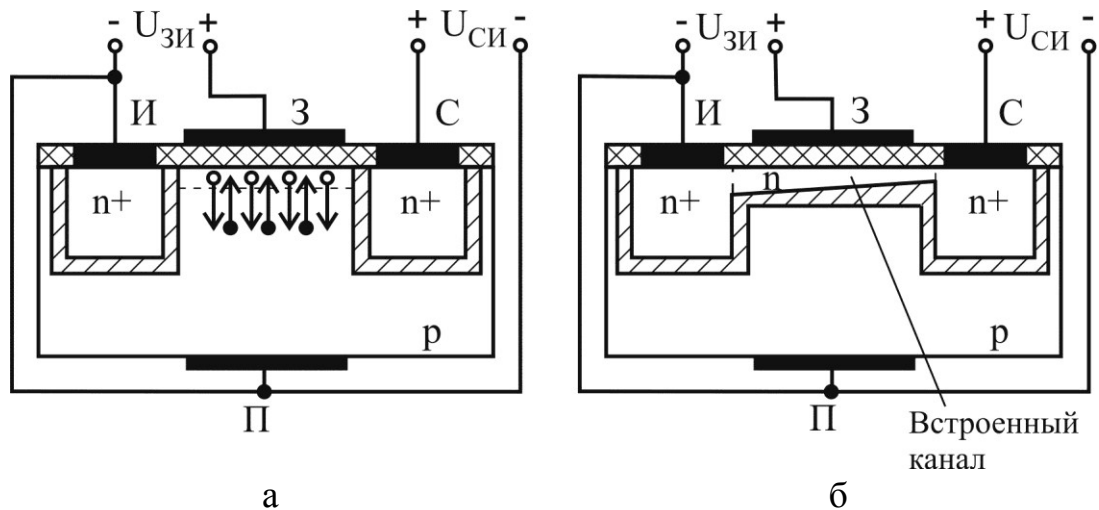


Рис. 7.2. Структура МДП-транзистора:

а – с индуцированным каналом; б – с встроенным каналом

И – исток, З – затвор, С – сток, П – подложка

Полевые транзисторы включаются по схемам с общим затвором (ОЗ) (рис. 7.3, а), общим истоком (ОИ) (рис. 7.3, б), общим стоком (ОС) (рис. 7.3, в). Наиболее часто используется схема включения с ОИ.

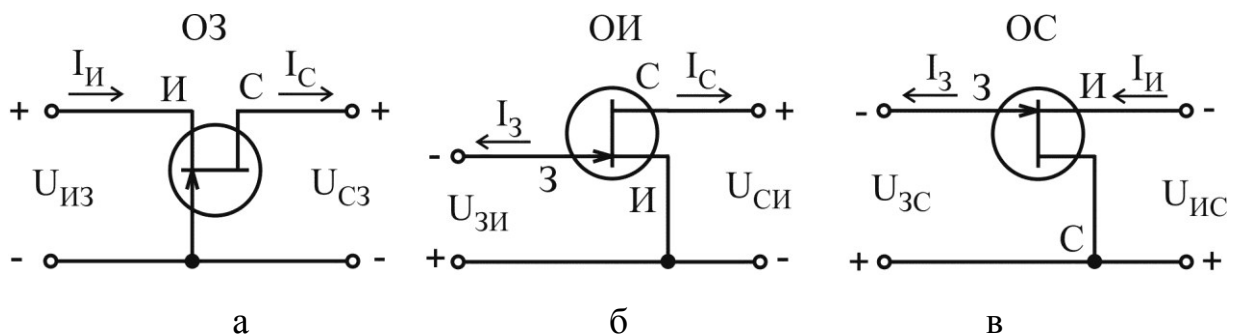


Рис. 7.3. Схемы включения полевых транзисторов:

а – с общим затвором; б – с общим истоком; в – с общим стоком

Статические ВАХ полевых транзисторов. Основными ВАХ ПТ являются выходные (стоковые) – $I_C = f(U_{СИ})|_{U_{ЗИ}=\text{const}}$ и характеристики передачи (сток-затворные) – $I_C = f(U_{ЗИ})|_{U_{СИ}=\text{const}}$.

На рис. 7.4 приведены выходные и передаточные ВАХ различных ПТ с каналом n-типа, включенных по схеме с ОИ: с управляющим p-n-переходом

(рис. 7.4, а, б); МДП-транзистора с индуцированным каналом (рис. 7.4, в, г) и МДП-транзистора со встроенным каналом (рис. 7.4, д, е).

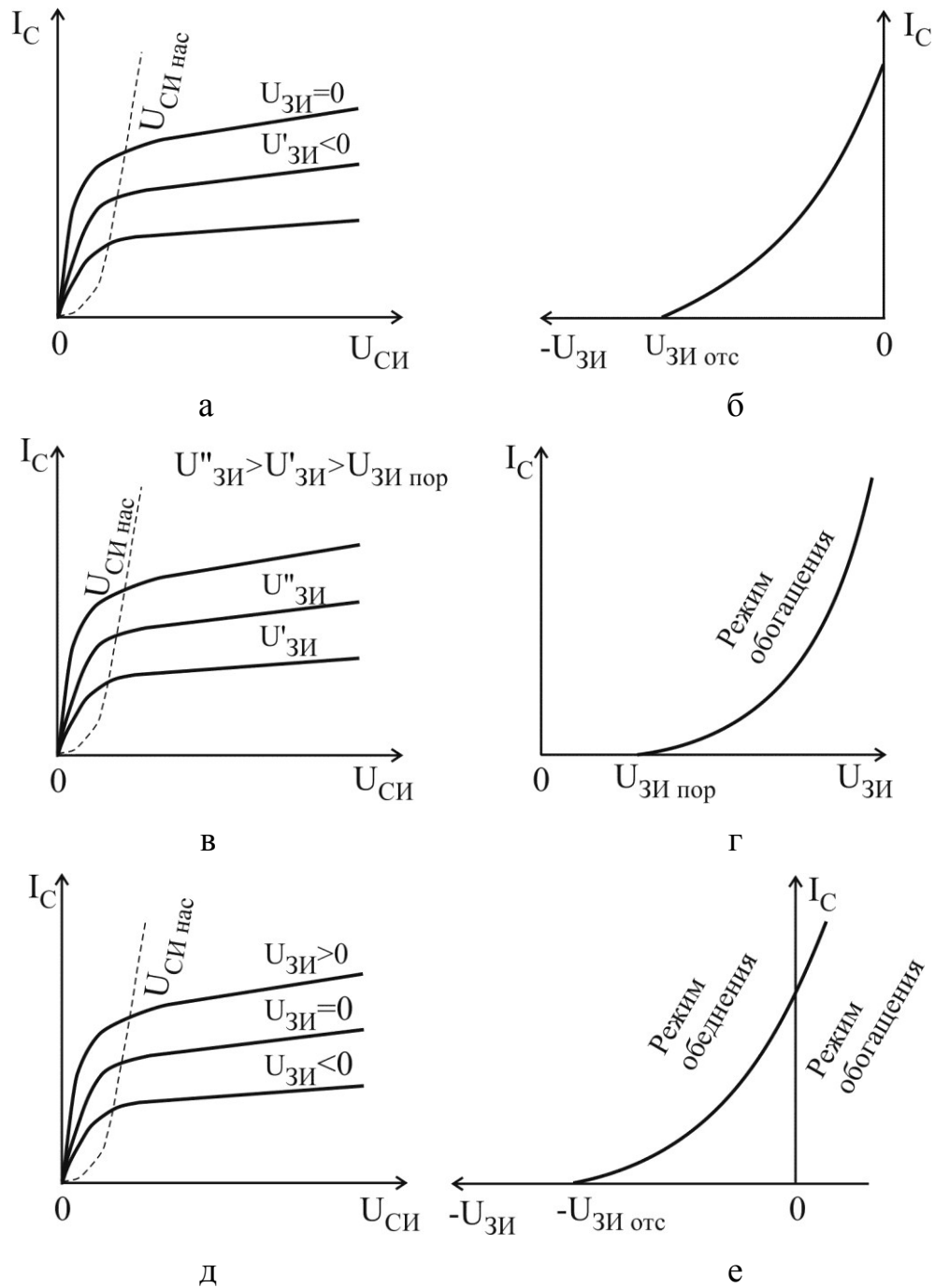


Рис. 7.4. Статические ВАХ полевых транзисторов:

а, б – с управляющим р-п-переходом;

в, г – МДП с индуцированным каналом; д, е – МДП с встроенным каналом;

а, в, д – выходные характеристики; б, г, е – сток-затворные характеристики

Дифференциальные параметры полевых транзисторов. Основными дифференциальными параметрами полевых транзисторов являются:

– крутизна $S = dI_c / dU_{зи} |_{U_{си} = \text{const}}$;

– внутреннее (дифференциальное) сопротивление $R_i = dU_{си}/dI_{и}|_{U_{зи}=\text{const}}$

;

– коэффициент усиления по напряжению $\mu = dU_{си}/dU_{зи}|_{I_c=\text{const}}$.

Все три параметра связаны выражением $\mu = SR_i$.

Параметры транзисторов можно определить по статическим характеристикам, как показано на рис. 7.5. Для рабочей точки А ($U'_{си}$, I'_c , $U'_{зи}$) крутизна и дифференциальное сопротивление определяются следующими выражениями:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \Big|_{U_{си}=U'_{си}} = \frac{I^v_c - I^{iv}_c}{U'''_{зи} - U''_{зи}} \Big|_{U_{си}=U'_{си}} \quad (7.2);$$

$$R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \Big|_{U_{зи}=U'_{зи}} = \frac{U'''_{си} - U''_{си}}{I'''_c - I''_c} \Big|_{U_{зи}=U'_{зи}} \quad (7.3).$$

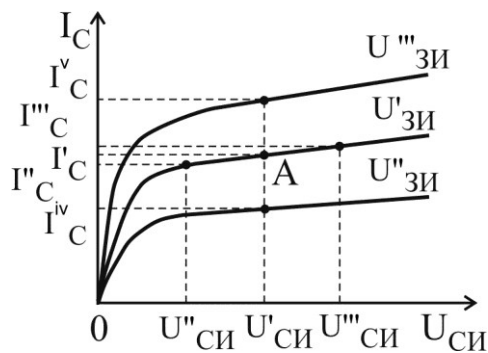


Рис. 7.5. Определение дифференциальных параметров ПТ по семейству выходных ВАХ

В настоящее время широкое распространение получили ПТШ, выполненные из арсенида галлия и работающие на частотах до 30 ГГц, которые используются в маломощных усилителях СВЧ, усилителях мощности и генераторах.

УГО ПТ, полярности подключения источников напряжения и режимы работы приведены в табл. 7.1. Для маркировки ПТ как и для БТ используется буквенно-

цифровая система обозначений согласно ОСТ 11.336.038-77.

Полевые транзисторы

Тип ПТ	Тип канала	Тип подложки	Условное обозначение и полярности внешних напряжений	Режим работы
Транзистор с управляющим р-п-переходом	n	p		—
	p	n		—
МДП-транзистор с индуцированным каналом	n	p		Обогащение
	p	n		Обогащение
МДП-транзистор со встроенным каналом	n	p		Обогащение (обеднение)
	p	n		Обогащение (обеднение)

2. Контрольные вопросы

Контрольные вопросы и задания и задания

- Какие существуют разновидности ПТ?
- Перечислите основные элементы конструкции ПТ с управляющим р-п-переходом и МДП-транзисторов.
- Поясните устройство и принцип действия ПТ с управляющим р-п-переходом.
- Поясните принцип действия МДП-транзисторов со встроенным и индуцированным каналом. Опишите режимы работы этих транзисторов.
- Изобразите график и поясните поведение характеристики передачи и выходных характеристик ПТ различного типа.
- Какие напряжения называются напряжением отсечки $U_{ЗИ\text{отс}}$ и пороговым напряжением $U_{ЗИ\text{пор}}$?
- Перечислите области применения ПТ.
- Почему ПТ обладает усилительными свойствами?
- Какими физическими явлениями ограничивается диапазон рабочих частот в ПТ?

10. Поясните физический смысл дифференциальных параметров ПТ – S , R_i , μ ?