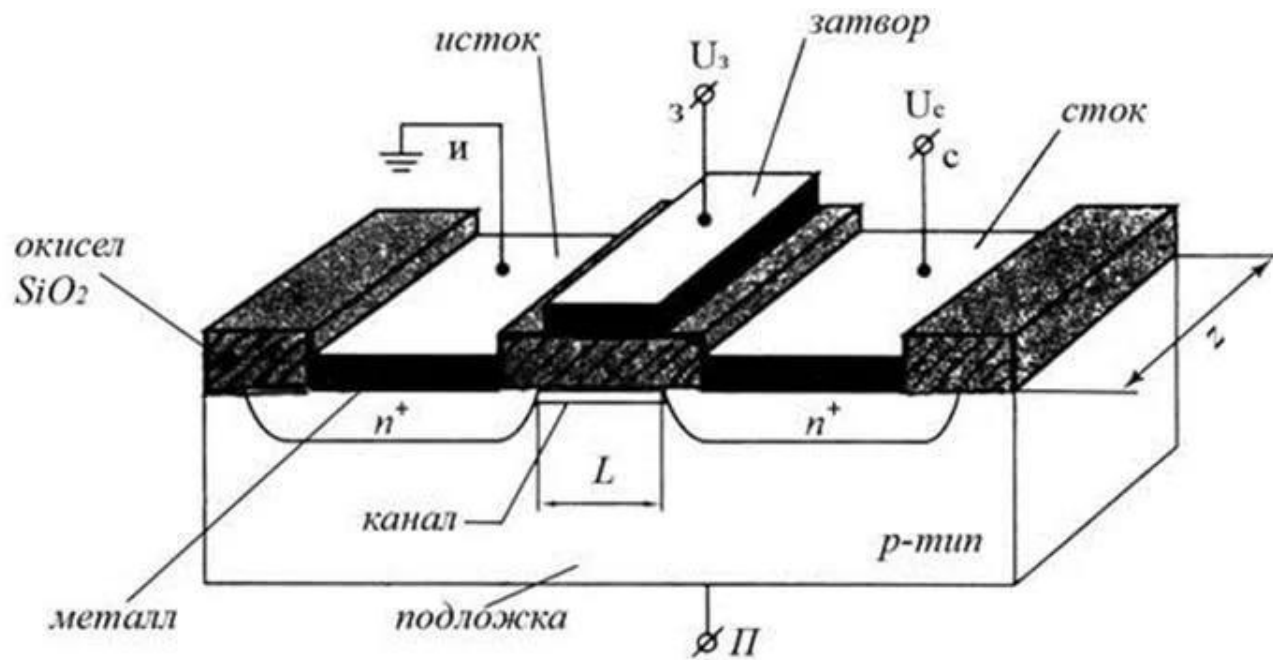


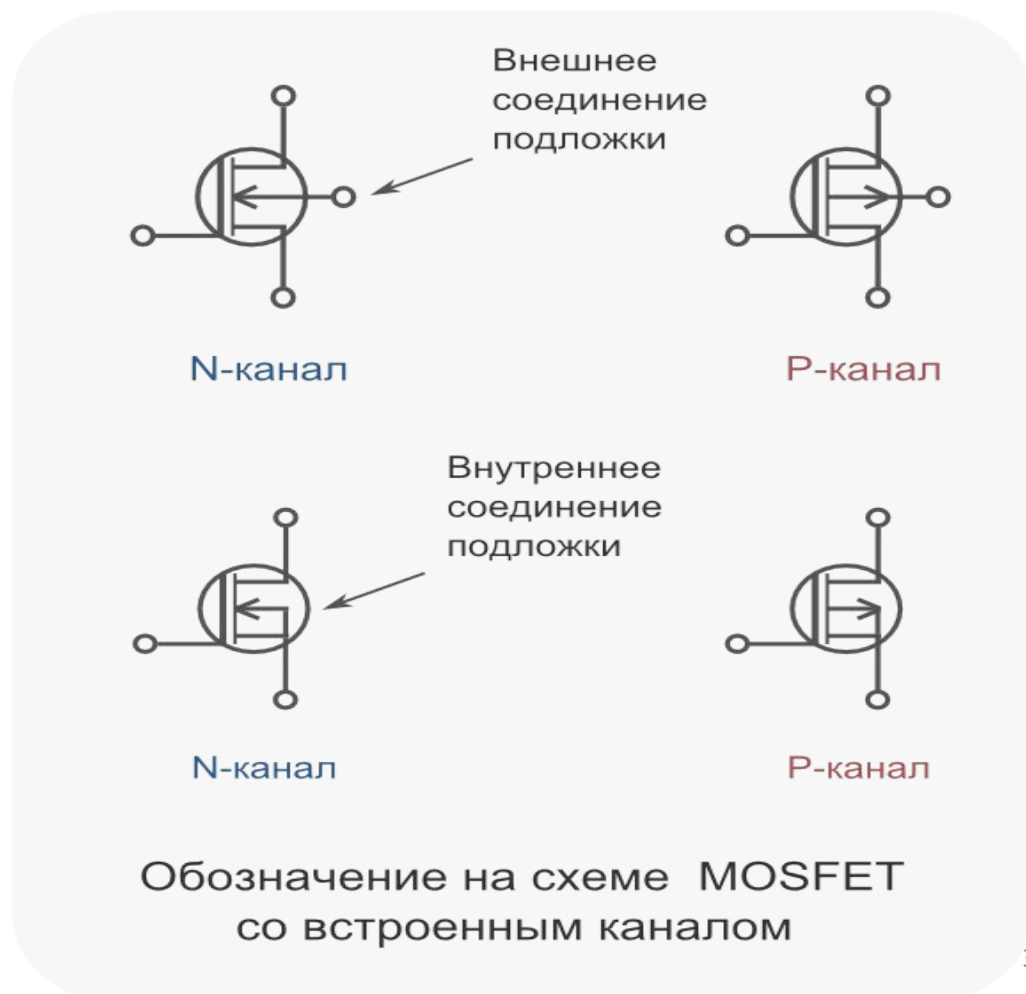
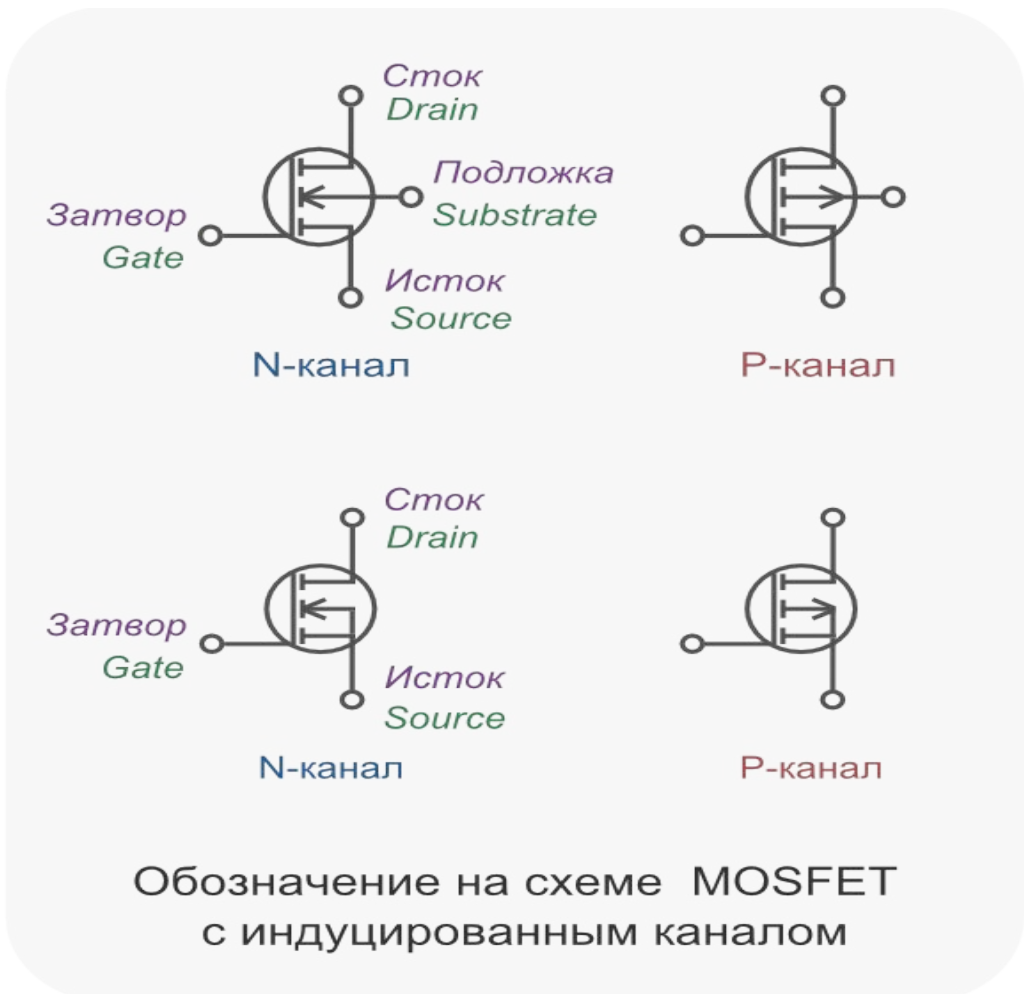
МДП полевой транзистор

# Основные элементы структуры МДП-транзистора



- Основной элемент для этих транзисторов – структура металл-диэлектрик-полупроводник.
- Затвор – это управляющий электрод
- Подложка – монокристаллический полупроводник, на котором изготавливается МДП-транзистор
- Две сильнолегированные области – исток и сток
- Канал – область подложки под истоком, стоком и затвором
- Подзатворный диэлектрик – диэлектрический слой между затвором и каналом

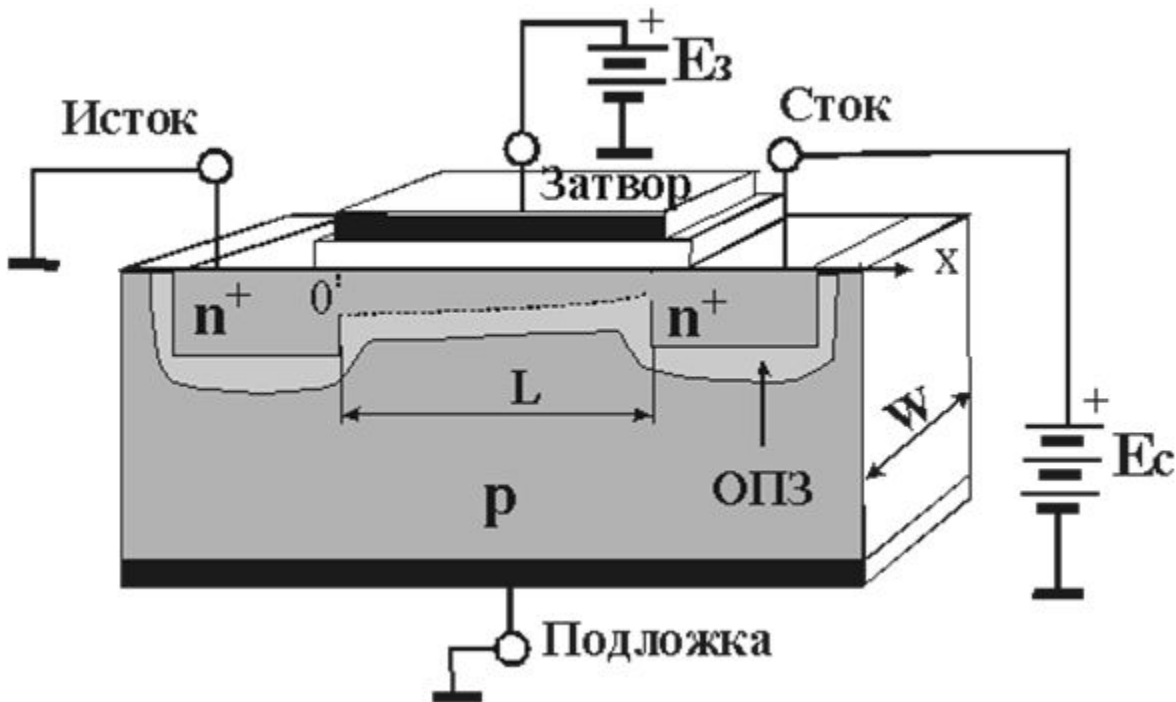
В зависимости от технологии изготовления различают две разновидности МДП-транзисторов: **со встроенным каналом**, созданным в процессе изготовления, и **с индуцированным каналом**, который наводится электрическим полем под действием напряжения на затворе. Канал может быть *p*-типа и *n*-типа.



# Принцип работы МДП-транзистора

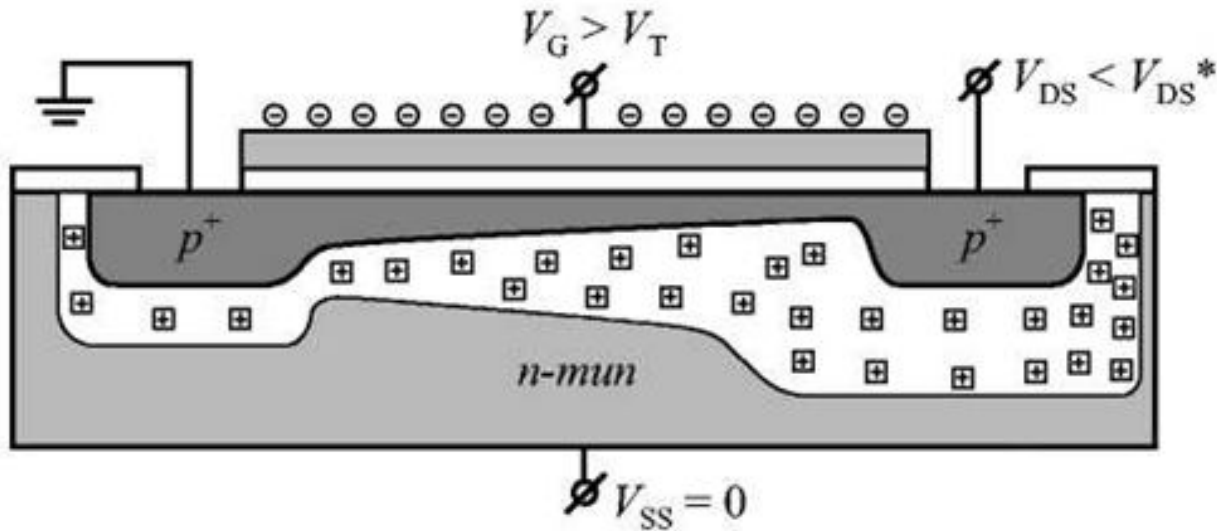
- **Эффект поля.** Эффект поля состоит в том, что под действием внешнего электрического поля **изменяется концентрация свободных носителей заряда в приповерхностной области полупроводника.**
- В зависимости от знака и величины приложенного напряжения, приложенного к затвору наблюдаются 4 состояния ОПЗ: **обогащение, обеднение, сильная и слабая инверсии.**
- $V_G$  - напряжение на затворе
- $V_{DS}$  - напряжение на стоке
- $V_{SS}$  - напряжение на подложке
- $I_{DS}$  - ток между истоком и стоком
- $I_{SS}$  - ток в цепи «затвор-канал»
- $V_T$  - пороговое напряжение (напряжение на затворе, при котором происходит формирование инверсионного канала).

# Принцип работы МДП-транзистора



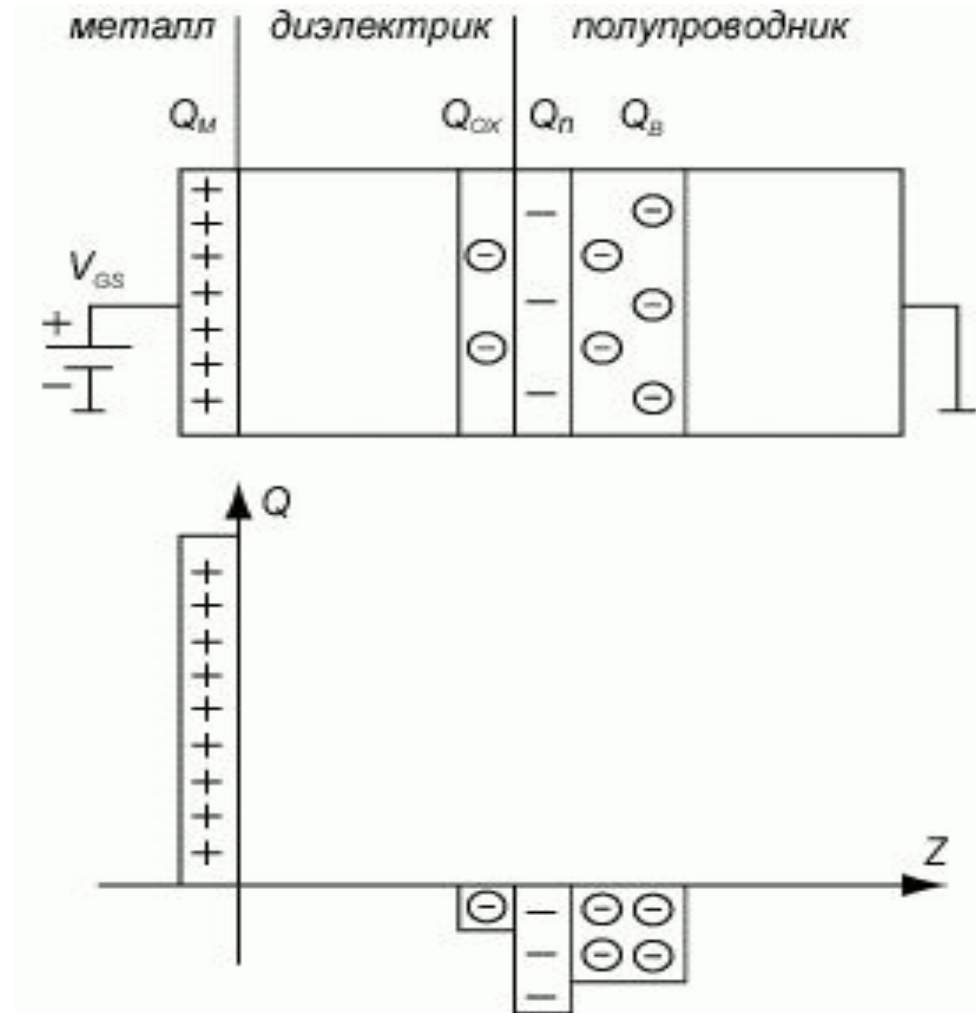
- **Может работать только в области слабой и сильной инверсии, т.е. в том случае, когда инверсионный канал между истоком и стоком отделен от квазинейтрального объема подложки областью обеднения.**

# Выбор знаков напряжений в МДП-транзисторе



- знак напряжения на стоке нужно выбрать так, чтобы стоковый переход был смещен в обратном направлении.
- Для n-канальных транзисторов это условие  $V_{DS} > 0$ .
- Для p-канальных транзисторов это условие  $V_{DS} < 0$ .

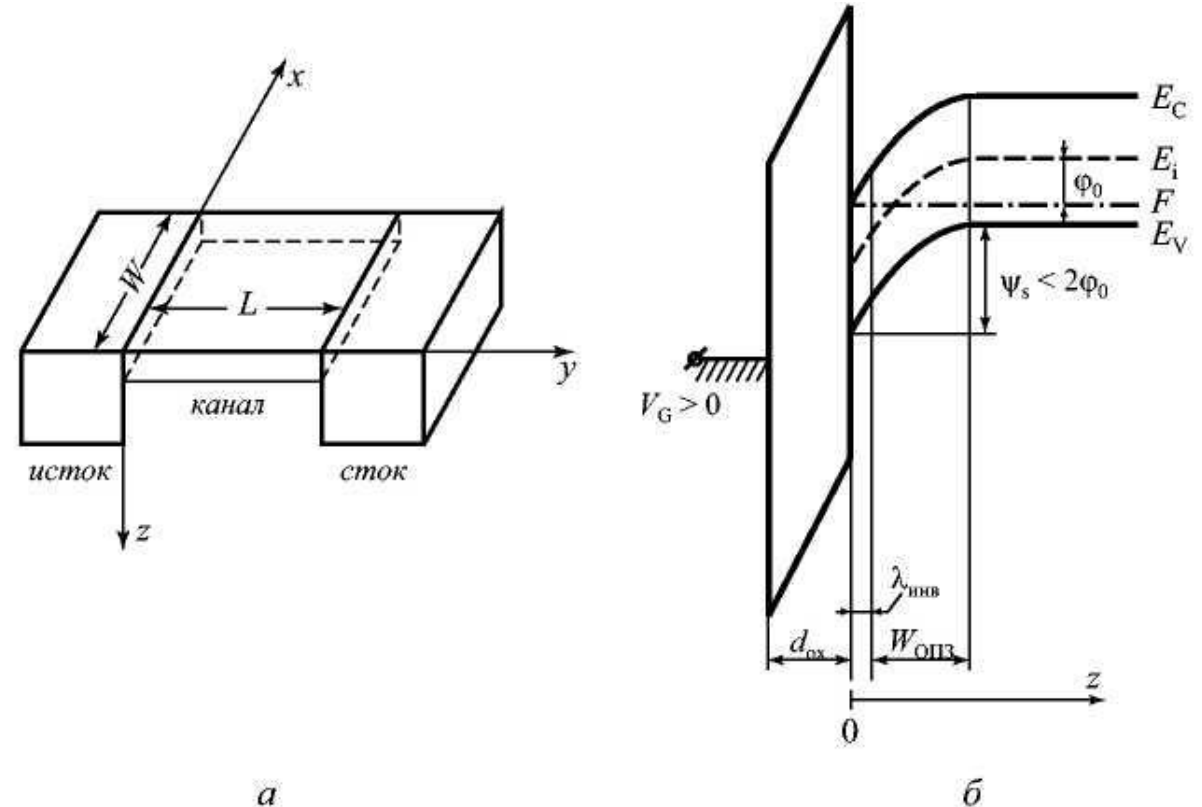
# Характеристики МДП-транзистора в области плавного канала



# Характеристики МДП-транзистора в области плавного канала

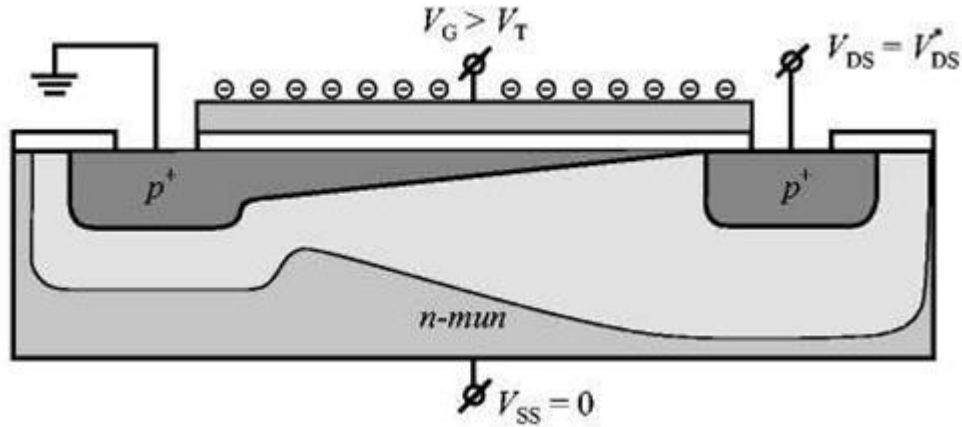
- $W$  - ширина канала
- $L$  - длина канала
- $\mu_n$  - подвижность электрона
- $C_{ox}$  - удельная емкость подзатворного диэлектрика
- $V_{DS}$  - напряжение на стоке
- $I_{DS}$  - ток между истоком и стоком
- $V_T$  - пороговое напряжение (напряжение на затворе, при котором происходит формирование инверсионного канала)

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

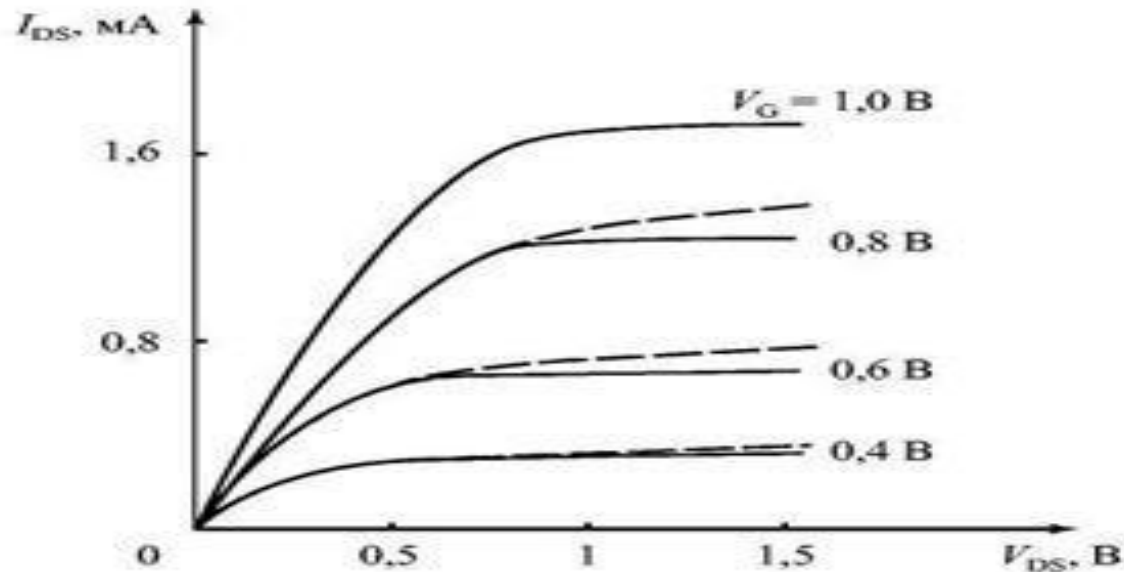




# Характеристики МДП-транзистора в области отсечки

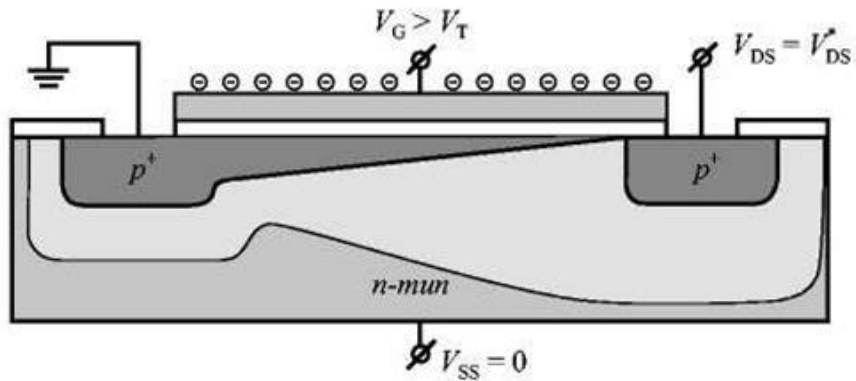


- $I_{DS} = \frac{W}{2L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_T)^2$  ток стока для области отсечки

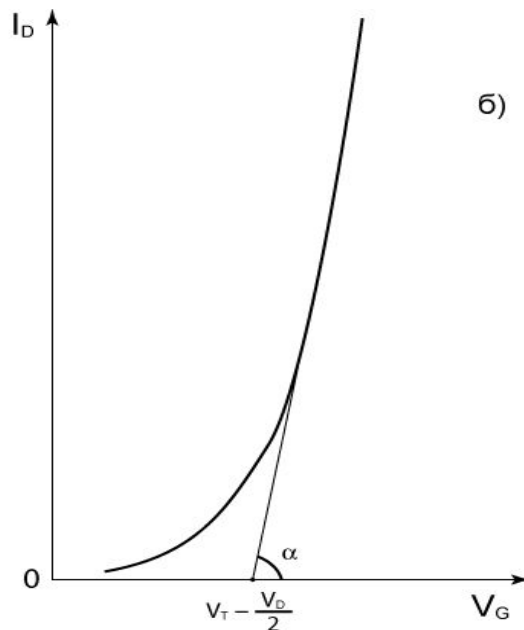
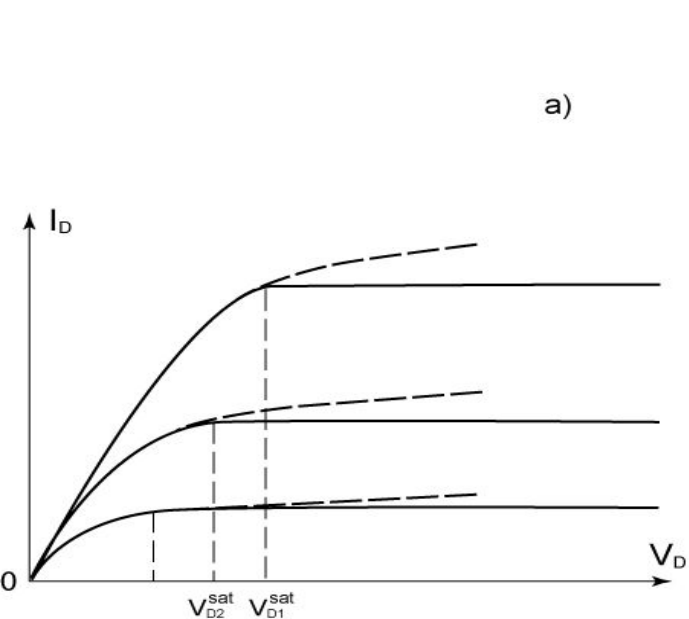


- При значительных величинах напряжения исток-сток и относительно коротких каналах в области отсечки наблюдается эффект модуляции длины канала

# Характеристики МДП-транзистора в области отсечки



- При значительных величинах напряжения исток-сток и относительно коротких каналах в области отсечки наблюдается эффект модуляции длины канала



- Вах МДП-транзистора с учетом длины модуляции канала

$$I_{DS} = \frac{W}{2L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_T)^2 \frac{1}{1 - \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(V_{DS} + V_T - V_G)}{qN_A}}}$$

# Эффект смещения подложки

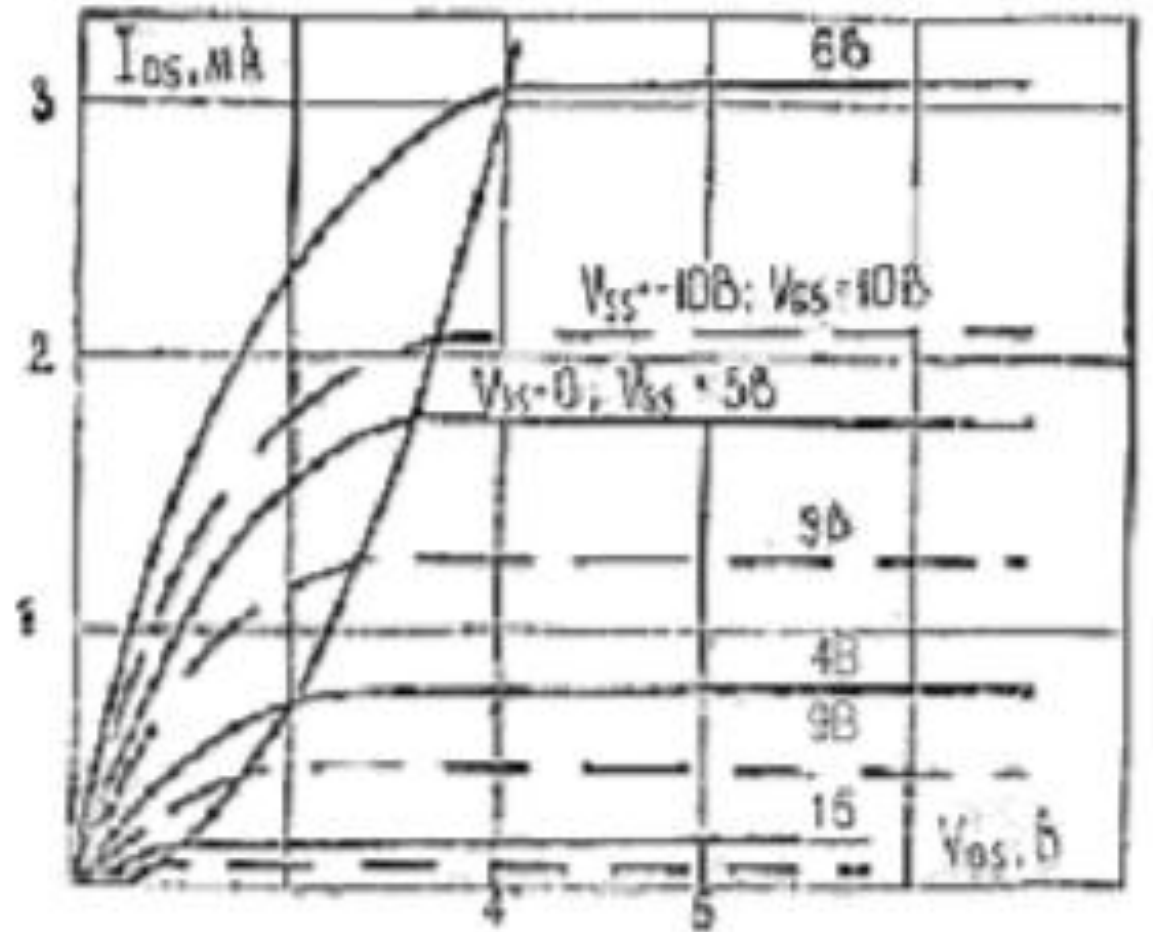
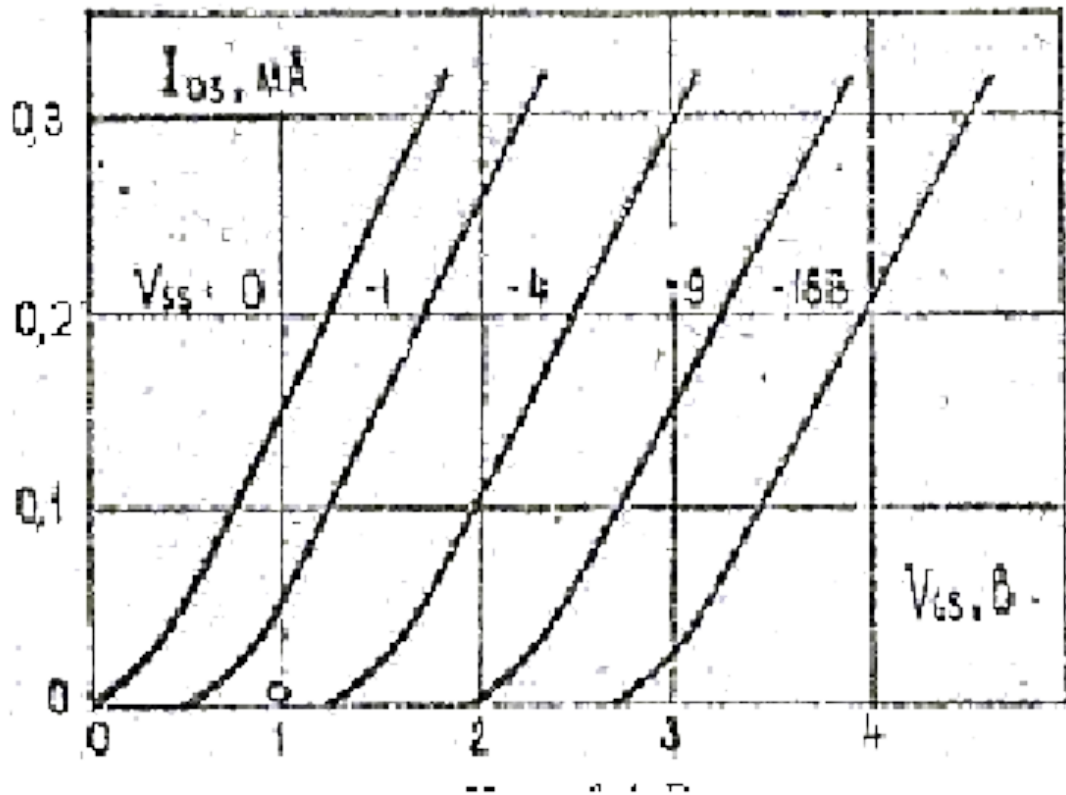
- Увеличение заряда ионизованных акцепторов

$$\Delta Q_b = \sqrt{2q\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{s0} + V_{SS})}$$

- Изменение порогового напряжения

$$V_T = \frac{\Delta Q_b}{C_{OX}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{C_{OX}^2} [\sqrt{\varphi_{s0} + V_{SS}} - \sqrt{\varphi_{s0}}]}$$

# Эффект смещения подложки



# Малосигнальные параметры

- Крутизна характеристики  $S = \frac{dI_{DS}}{dV_g}$ ,  $V_g = const$
- Внутреннее сопротивление  $R_i = \frac{dV_{DS}}{dI_{DS}}$ ,  $V_{GS} = const$
- Коэффициент усиления  $\mu = \frac{dV_{DS}}{dV_G}$ ,  $I_S = const$
- $\mu = S * R_i$

# Малосигнальные параметры в области плавного канала

- $S = \frac{W}{2L} \mu_n C_{ox}$

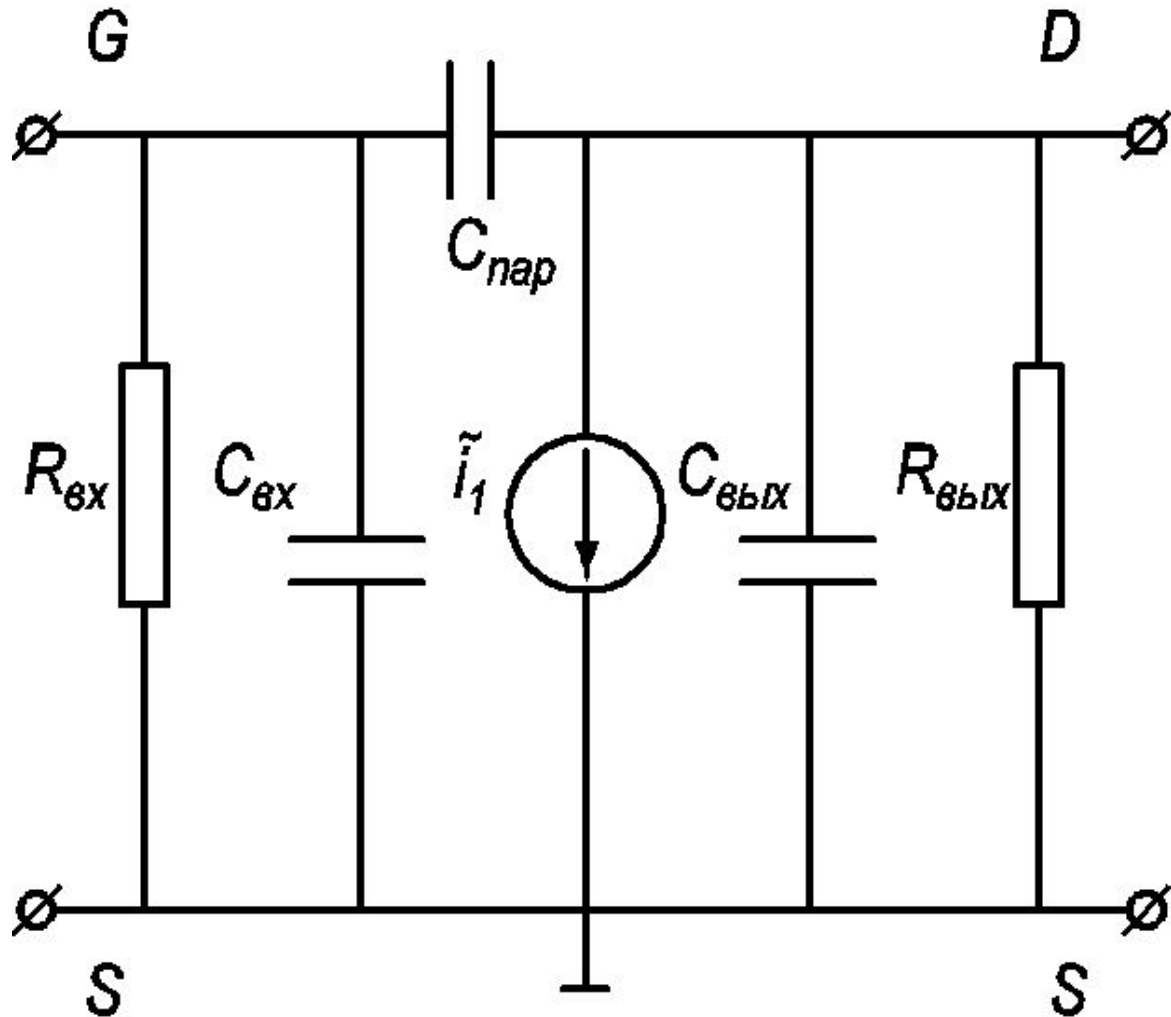
- $R_i = \left[ \frac{W}{2L} \mu_n C_{ox} (V_G - V_T - V_{DS}) \right]^{-1}$

- $\mu = S * R_i = \frac{V_{DS}}{V_G - V_T - V_{DS}} < 1$

# Малосигнальные параметры в области отсечки

- $S = \frac{W}{2L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_T) = 2 (V_{GS} - V_T)$
- $R_i = \frac{2(V_{DS} - V_G + V_T)}{I_{DS}} \frac{L}{\Delta L}$
- $\mu = \frac{4(V_{DS} - V_G + V_T)}{V_G - V_T} \frac{L}{\Delta L} \gg 1$

# Эквивалентная схема и быстродействие МДП-транзистора



- $\tilde{u} = u_0 \sin(\omega t)$  - напряжение
- $\tilde{i}_1 = S * \tilde{u}$  - ток стоковой цепи
- $\tilde{i}_2 = \tilde{u} 2\pi f C_{ox} WL$  - паразитный ток
- $f_{max} = \frac{\mu_n (V_{GS} - V)}{2\pi L^2}$  - максимальная частота