

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Полевой транзистор

Полевой транзистор Лилиенфельда

В 1925 г. **Юлий Эдгар Лилиенфельд**

предложил идею полевого транзистора

(18 апреля 1882, Львов —
28 августа 1963, Шарлотта-
Амалия, Виргинские
острова), физик,
изобретатель транзистора.

Jan. 28, 1930. J. E. LILIENTFELD 1,745,175
METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS
Filed Oct. 8, 1926

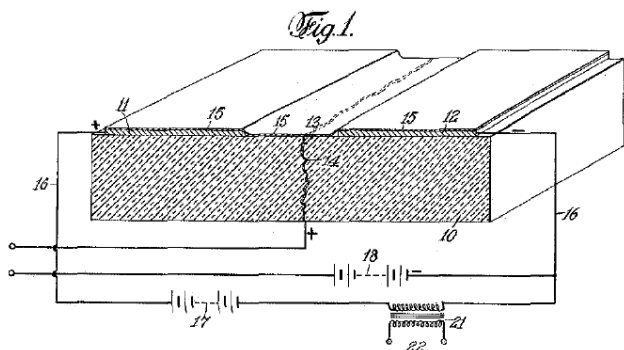
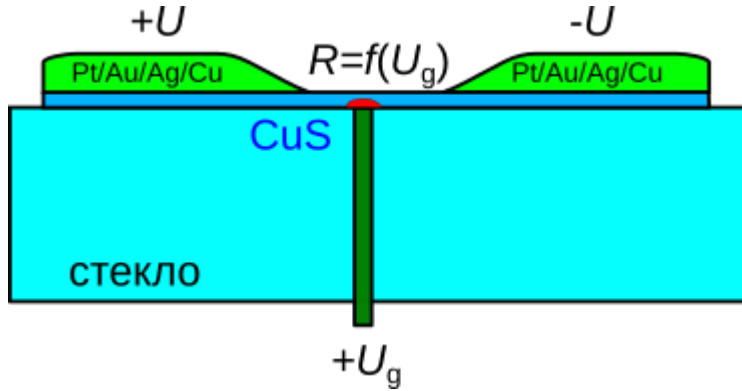


Иллюстрация из патента США
1 745 175 на «метод и устройство
управления электрическими
токами» с приоритетом от 8
октября 1926 года (выдан 28
января 1930 года).

В 1772, после Первого раздела Польши, **Львов** стал **столицей австрийской** провинции — формально независимого Королевства Галиции и Лодомерии. С 1772 по 1918 год город **официально** носил название **Лемберг**. Языком администрации после вхождения Львова в состав Австрии стал немецкий, а большинство должностей городского управления заняли немцы и чехи.

Полевой транзистор Лилиенфельда



Первый патент на полевой транзистор (комбинация металла и полупроводника) заявлен в 1926 г. (№1745175 от 1928 г.).

Второй патент заявлен в 1928-м (№1900018 от 1933 г.): полевой транзистор, работающий в режиме обеднения.

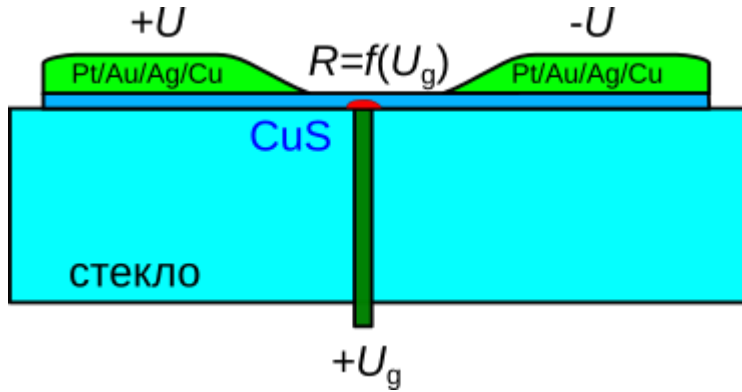
Схема из патента США

1 745 175 на «метод и устройство управления электрическими токами» с приоритетом от 8 октября 1926 года (выдан 28 января 1930 года).

Через плёнку сульфидированной меди CuS протекает ток при приложении напряжения к электродам (в патенте CuS наносится поверх электродов, но сути это не меняет).

Приложение напряжения к металлической фольге (предпочтительно из алюминиевой фольги), электроны электростатически отталкиваются или притягиваются к нему. В итоге ток через контакты модулируется напряжением U_g .

Полевой транзистор Лилиенфельда



Первый патент на полевой транзистор (комбинация металла и полупроводника) заявлен в 1926 г. (№1745175 от 1928 г.).

Второй патент заявлен в 1928-м (№1900018 от 1933 г.): полевой транзистор, работающий в режиме обеднения.

Схема из патента США

1 745 175 на «метод и устройство управления электрическими токами» с приоритетом от 8 октября 1926 года (выдан 28 января 1930 года).

Через плёнку сульфидированной меди CuS протекает ток при приложении напряжения к электродам (в патенте CuS наносится поверх электродов, но сути это не меняет).

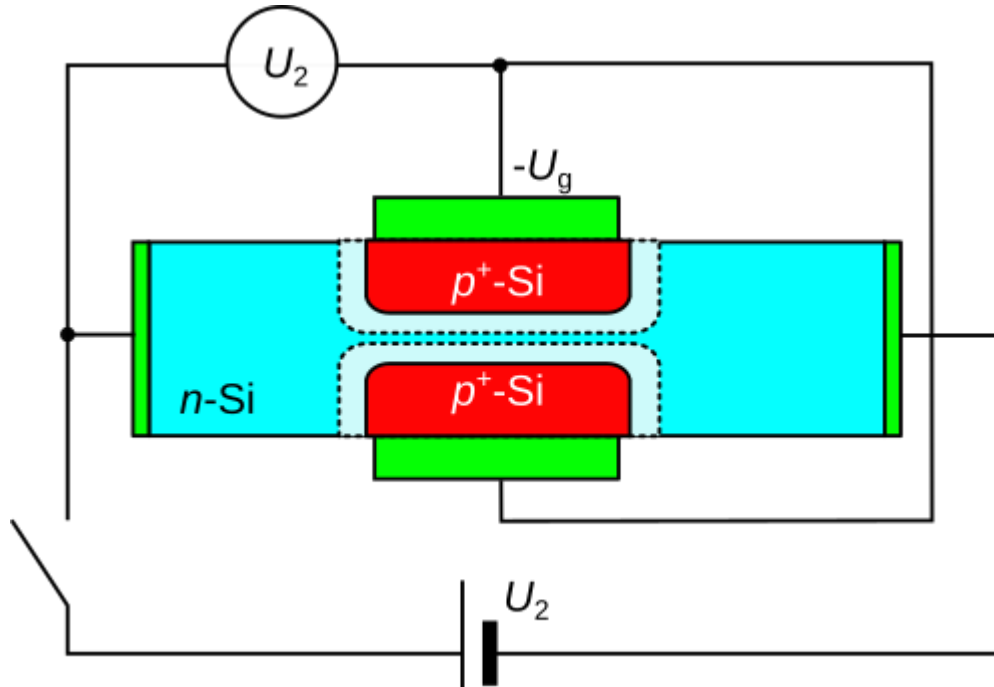
На самом деле в CuS образуется зона обеднения, размер которой модулируется приложенным напряжением. В результате геометрические размеры проводящего канала изменяются => меняется сопротивление плёнки.

Идея так и не была реализована.

Причина: **поверхностные состояния**.

Работающий прибор был создан в 1966 г.

Полевой транзистор Шокли



Идея Уильяма Шокли, 1952 г.

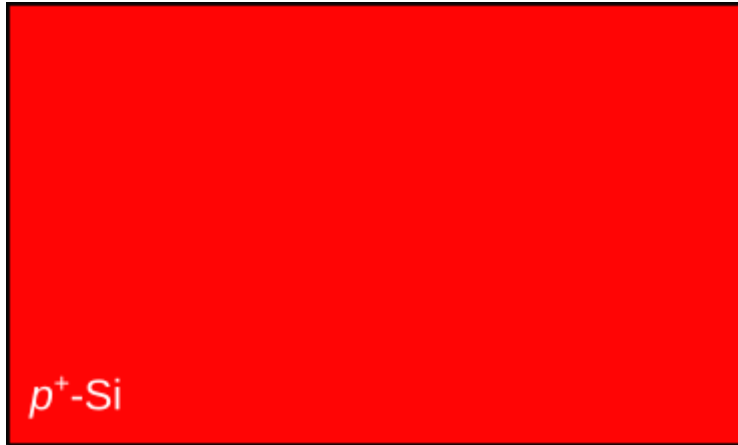
Рабочий канал должен быть повешён во внутрь п/п → поверхностные состояния не играют роли.

$$I_{SD} = f(U_1, U_2)$$

«... неожиданно Шокли потребовал монопольные права на изобретение. Формально он руководил работой, основанной на его же патенте. Однако патентные эксперты из Bell Laboratories выяснили, что патент Шокли практически повторяет патенты Лилиенфельда, поэтому никаких привилегий на полевой транзистор этой группе учёных вообще не было выдано.»

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)

Junction Field-Effect Transistor (JFET)



Обратно
смещённый p - n
переход

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)

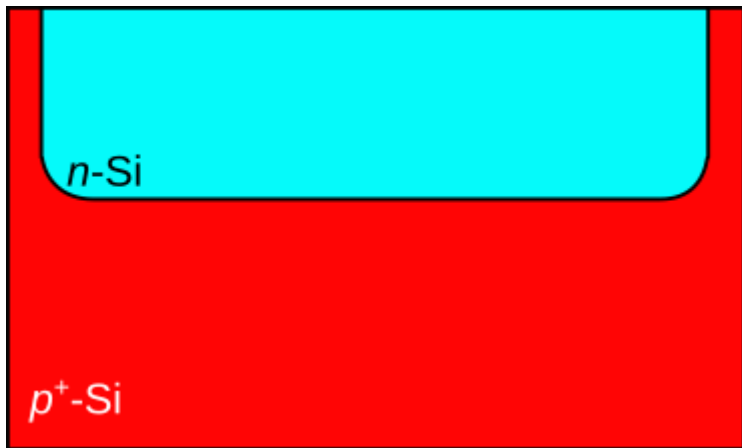
Junction Field-Effect Transistor (JFET)



Обратно
смещённый p - n
переход

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)

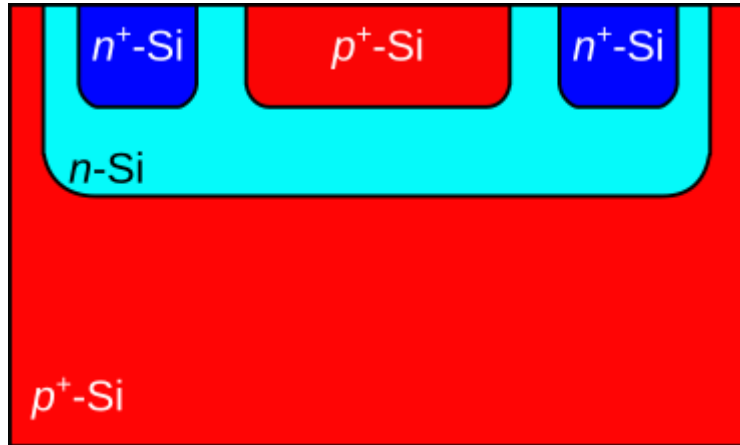
Junction Field-Effect Transistor (JFET)



Обратно
смещённый p - n
переход

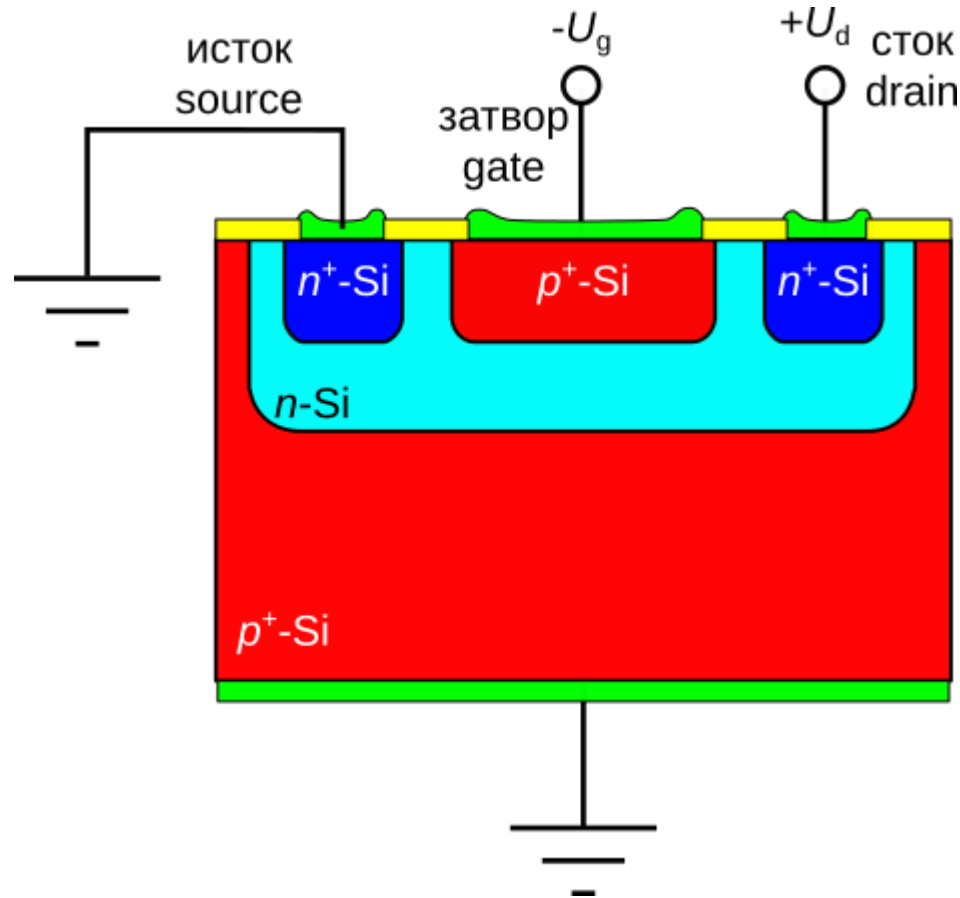
Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)

Junction Field-Effect Transistor (JFET)



Обратно
смещённый p - n
переход

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)

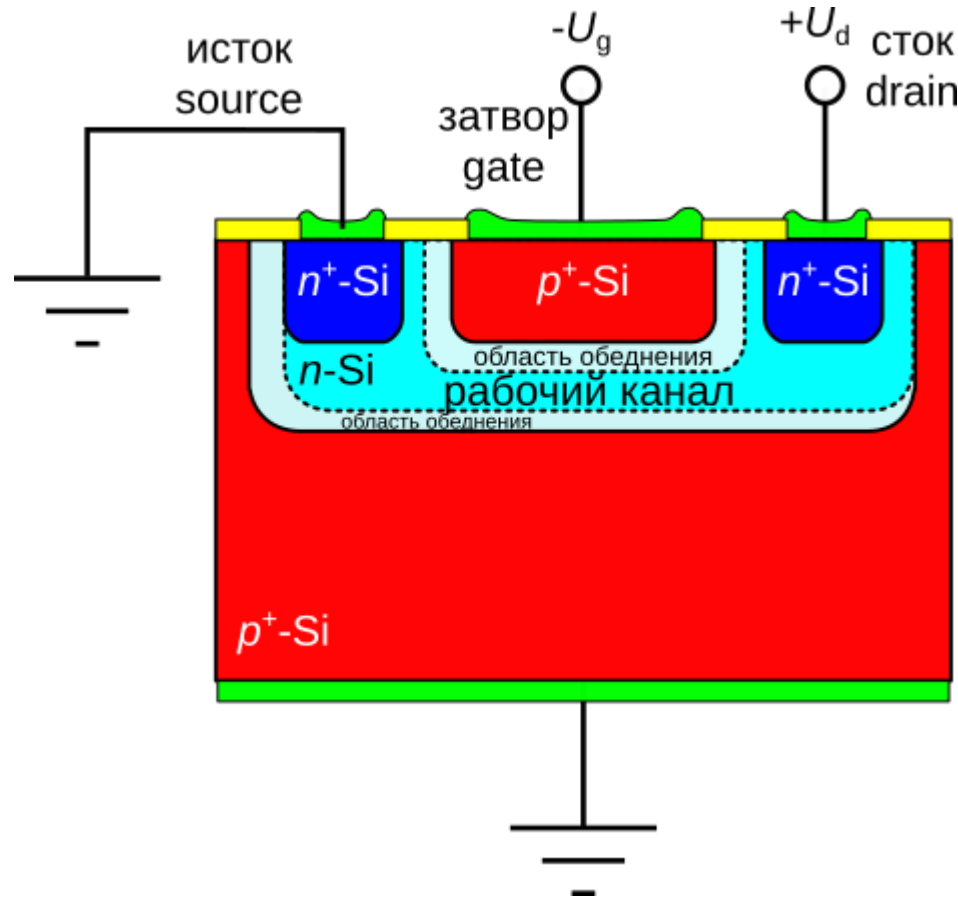


Junction Field-Effect Transistor (JFET)

Обратно смещённый p - n переход

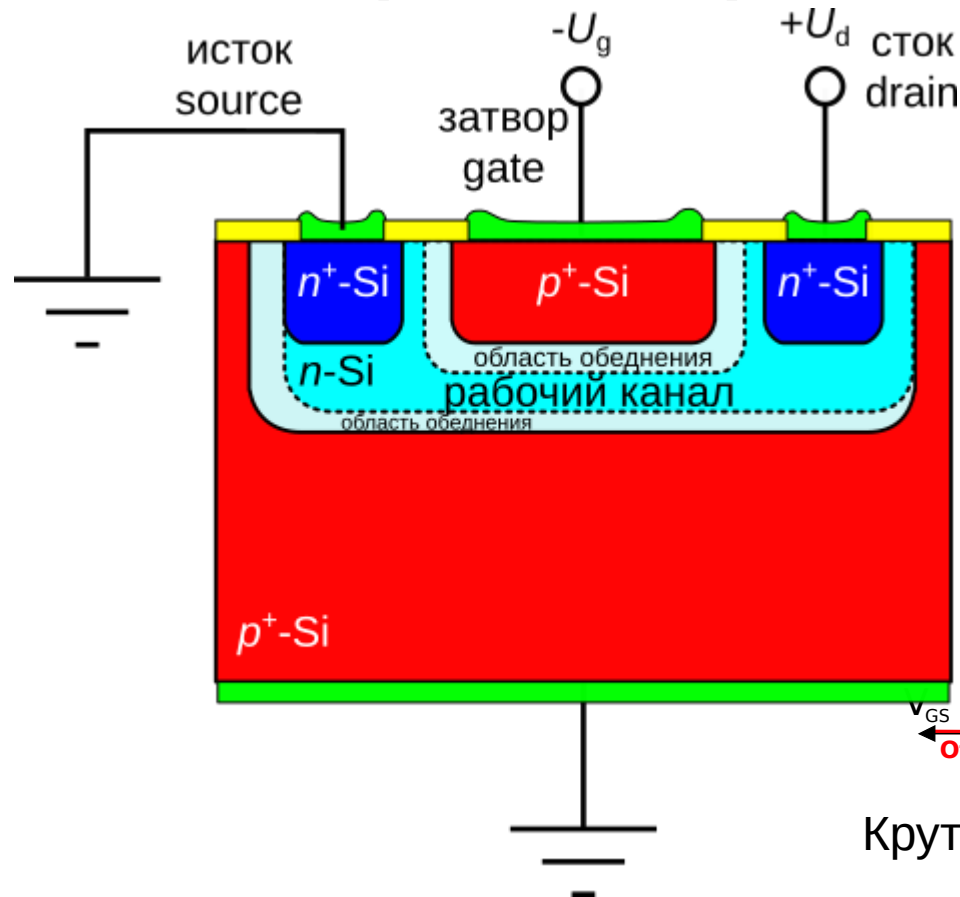
Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)

Junction Field-Effect Transistor (JFET)

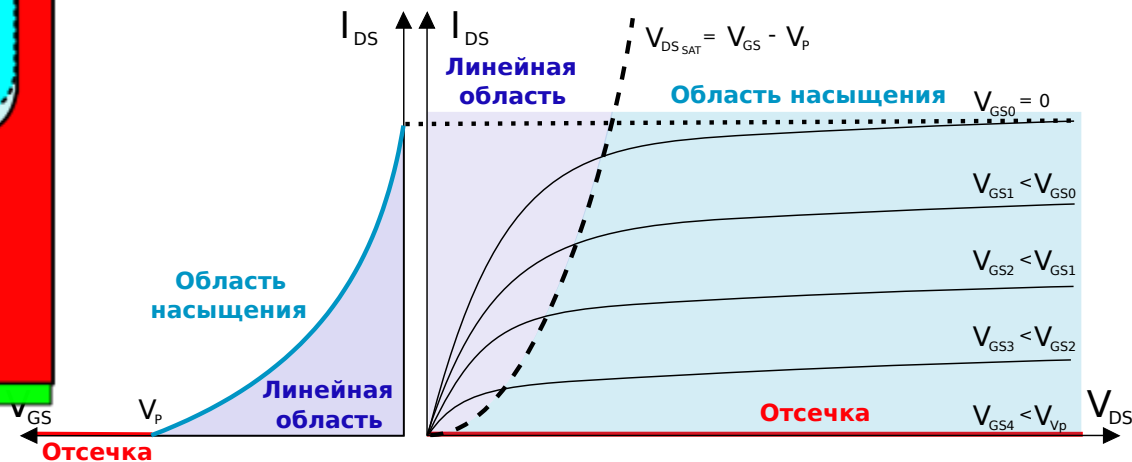


Обратно
смещённый p - n
переход

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)

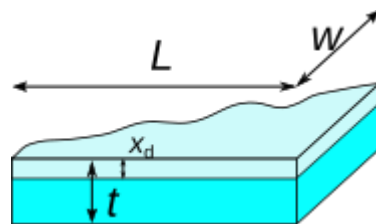
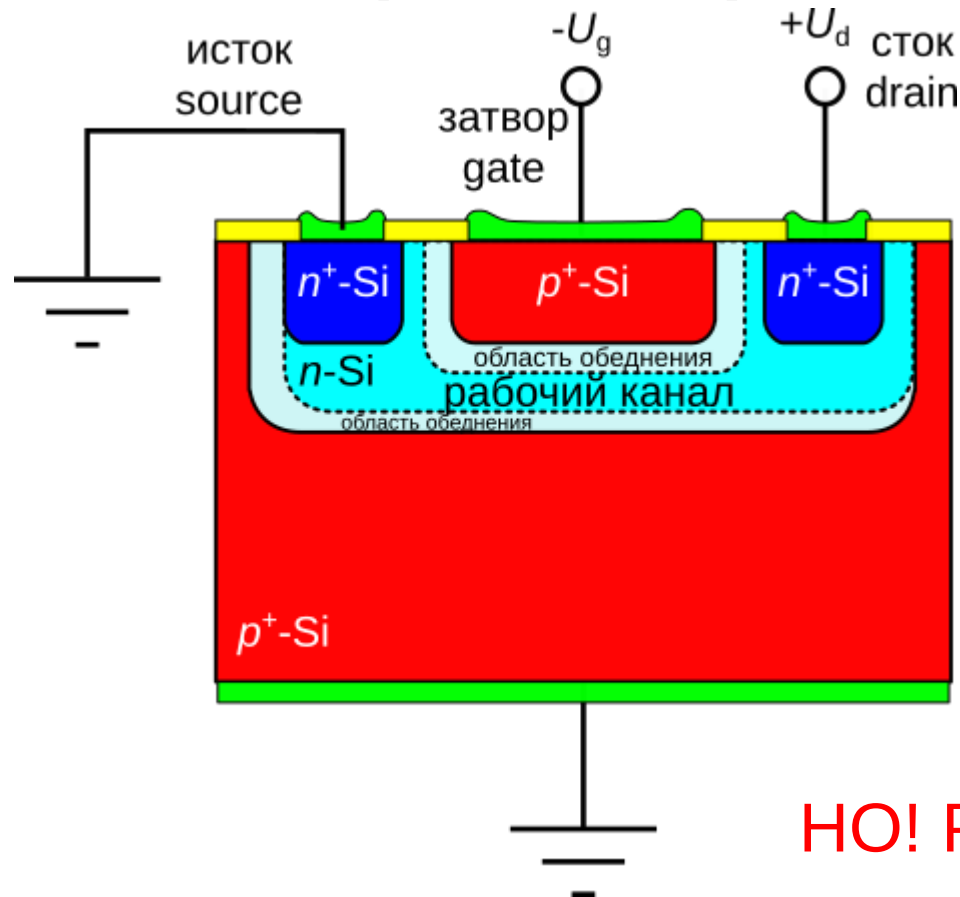


Чем выше отрицательное U_g , тем больше область обеднения в $n-Si$ канале \rightarrow уже канал \rightarrow сопротивление $R \uparrow$, ток $I_D \downarrow$



Крутизна $S = \frac{dI_{DS}}{dU_g}$, $[S] = C_M = \text{Ом}^{-1}$

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)



$$x_w = t - x_d \quad R_{ch} = \rho \frac{L}{S}, S = wx_w$$

$$x_d = \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_0 (\Phi_i - qU_g)}{q^2 N_d}}$$

$$R_{ch} = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{wx_w}$$

$$1/\rho = \sigma = qn\mu_n = qN_d\mu_n$$

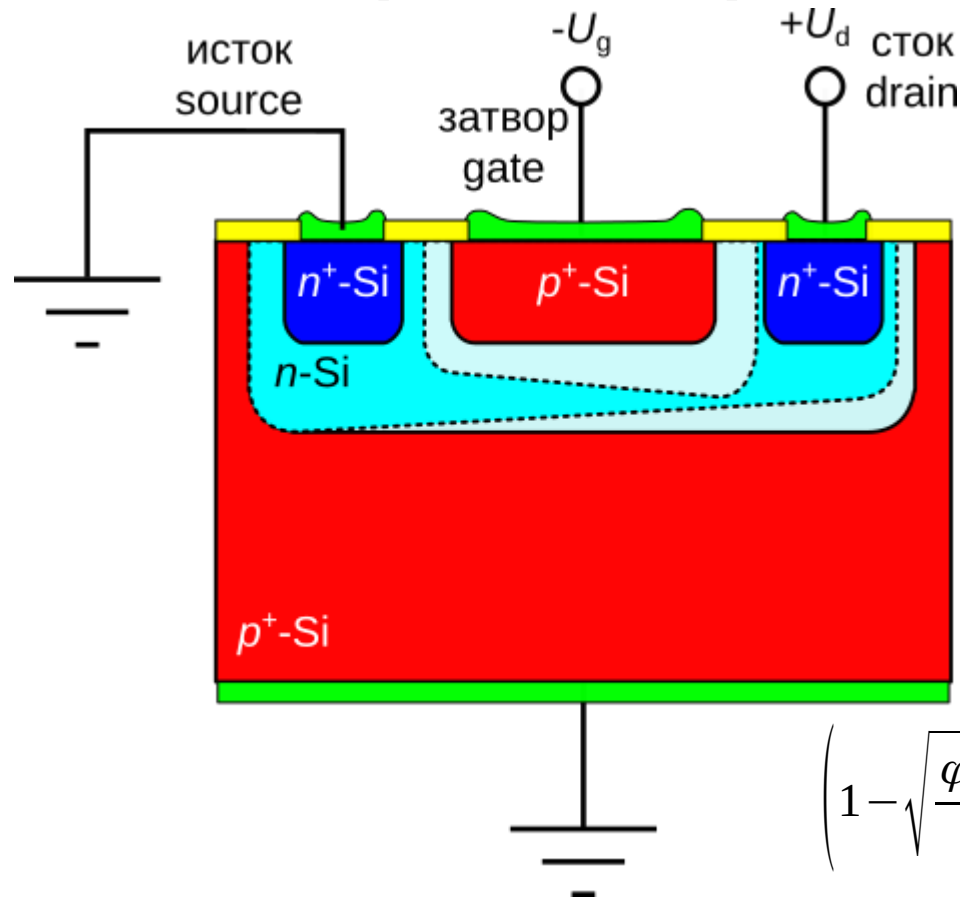
$$(n = N_d^+ = N_d)$$

$$I_{SD} = \frac{U_d}{R_{ch}} = \underbrace{\frac{w}{L} q N_d \mu_n t}_{G_0} \left(1 - \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_0 (\Phi_i - qU_g)}{q^2 t^2 N_d}} \right) U_d$$

$$I_{SD} \sim U_d$$

НО! Реальная картина более сложна

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)



Реальная картина такова:

по мере приближения к стоку потенциал $U(z)$ растёт

$$dR = \frac{dz}{L} \frac{1}{G_0} \left(1 - \sqrt{\frac{\Phi_i/q - U_g + U(z)}{U_{отс}}} \right)^{-1}$$

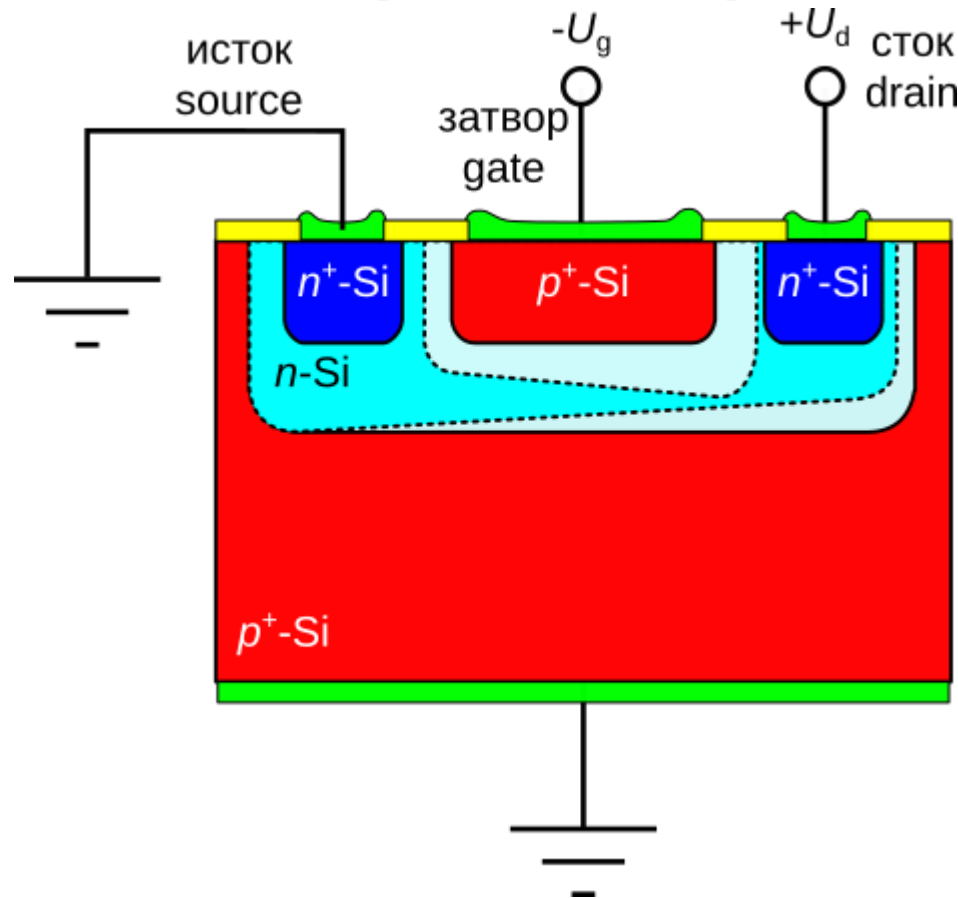
$$U_{отс} = \frac{q N_d t^2}{2 \epsilon \epsilon_0}$$

$$\varphi_i = \Phi_i/q$$

$$dU(z) = I_{DS} dR = \frac{dz}{L} \frac{1}{G_0} \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi_i - U_g + U(z)}{U_{отс}}} \right)^{-1}$$

$$\left(1 - \sqrt{\frac{\varphi_i - U_g + U(z)}{U_{отс}}} \right) dU(z) = \frac{I_{DS}}{G_0} \frac{dz}{L} \int_{z=0 \dots L, U(z)=0 \dots U_d}$$

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)



$$U_d - \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{U_{отс}}} \left((\varphi_i - U_g + U_d)^{3/2} - (\varphi_i - U_g)^{3/2} \right) = \frac{I_{DS}}{G_0}$$

$$I_{DS} = G_0 \left(U_d - \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{U_{отс}}} \left((\varphi_i - U_g + U_d)^{3/2} - (\varphi_i - U_g)^{3/2} \right) \right)$$

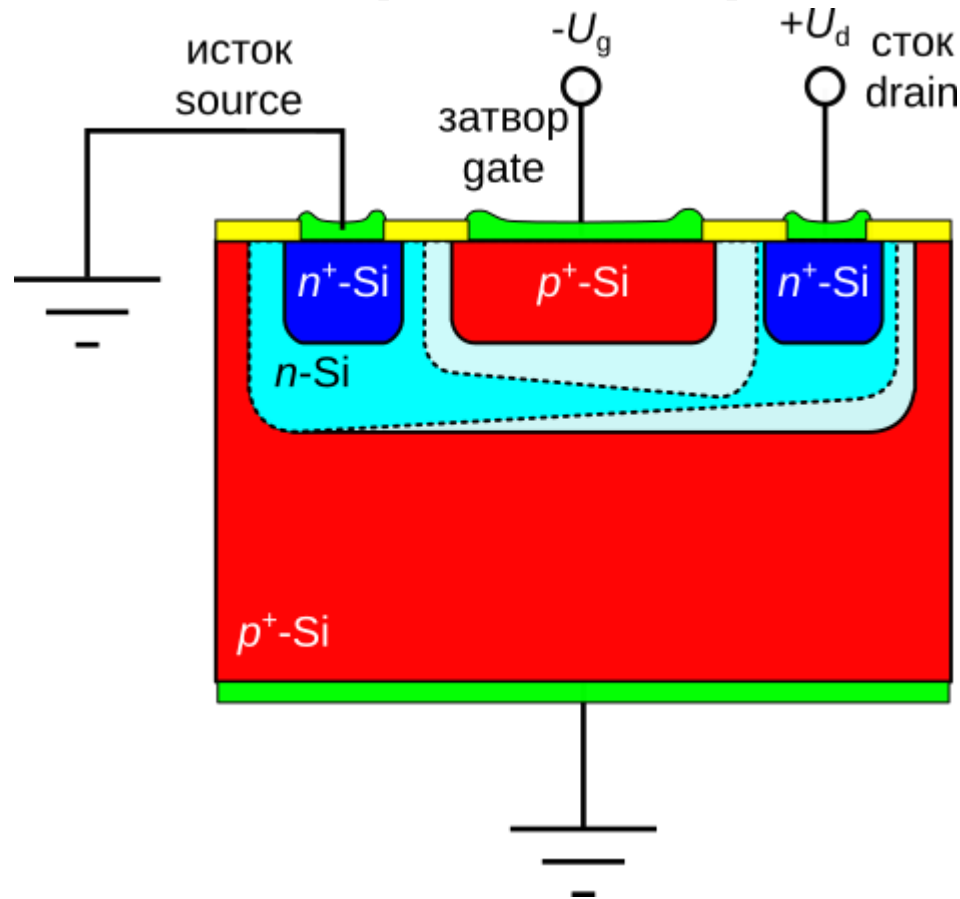
Область обеднения смыкается → насыщение → рабочий режим

$$t = x_d = \sqrt{\frac{2 \varepsilon \varepsilon_0 (\varphi_i - U_g + U_d)}{q N_d}} \Rightarrow U_d = U_g - \varphi_i + \frac{q N_d t^2}{2 \varepsilon \varepsilon_0}$$

$$U_d = U_g - \varphi_i + U_{отс}$$

$$I_{DS} = G_0 \left(U_g - \varphi_i + U_{отс} - \frac{2}{3} \left(U_{отс} - \frac{(\varphi_i - U_g)^{3/2}}{\sqrt{U_{отс}}} \right) \right)$$

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)



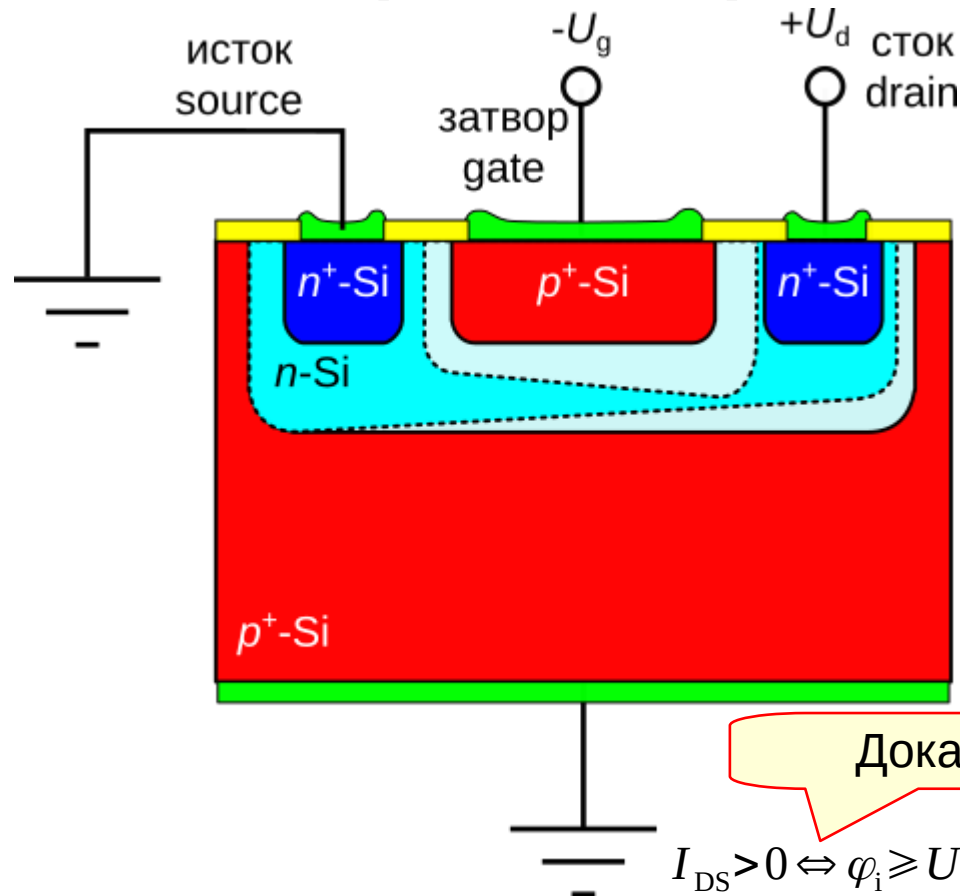
Область обеднения смыкается → насыщение → рабочий режим

$$I_{DS} = G_0 \left(U_g - \varphi_i + U_{отс} - \frac{2}{3} \left(U_{отс} - \frac{(\varphi_i - U_g)^{3/2}}{\sqrt{U_{отс}}} \right) \right)$$

$$S = \frac{dI_{DS}}{dU_g} = G_0 \left(1 + \frac{2}{3} \left(-\frac{3}{2} \right) \sqrt{\frac{\varphi_i - U_g}{U_{отс}}} \right)$$

$$S = G_0 \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi_i - U_g}{U_{отс}}} \right)$$

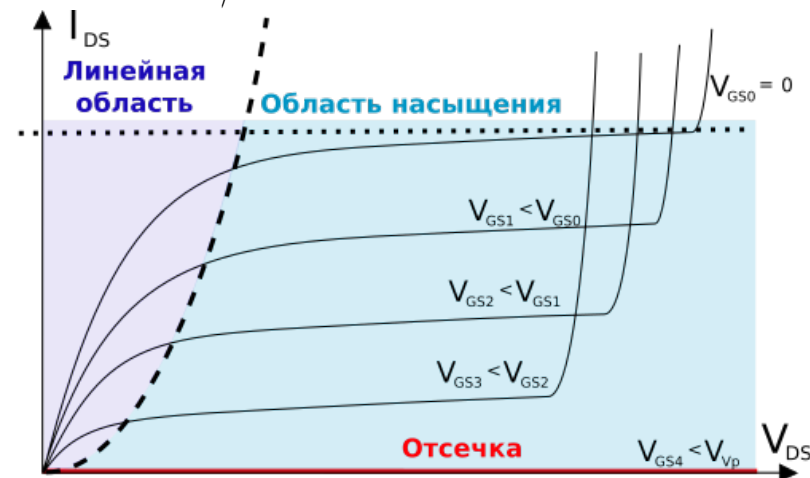
Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом (ПТУП)



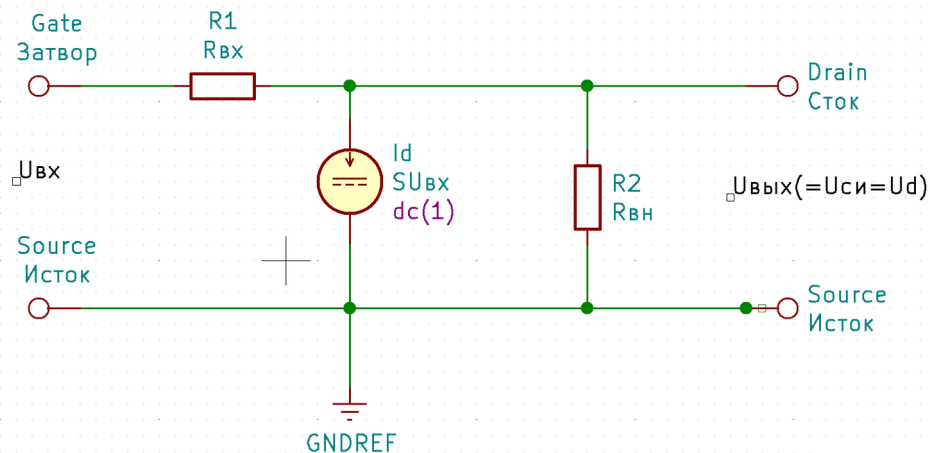
Рабочий режим

$$I_{DS} = G_0 U_{отс} \left(1 + \frac{U_g - \varphi_i}{U_{отс}} - \frac{2}{3} \left(1 - \left(\frac{\varphi_i - U_g}{U_{отс}} \right)^{3/2} \right) \right)$$

$$S = G_0 \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi_i - U_g}{U_{отс}}} \right) \quad U_d \geq U_g - \varphi_i + U_{отс}$$



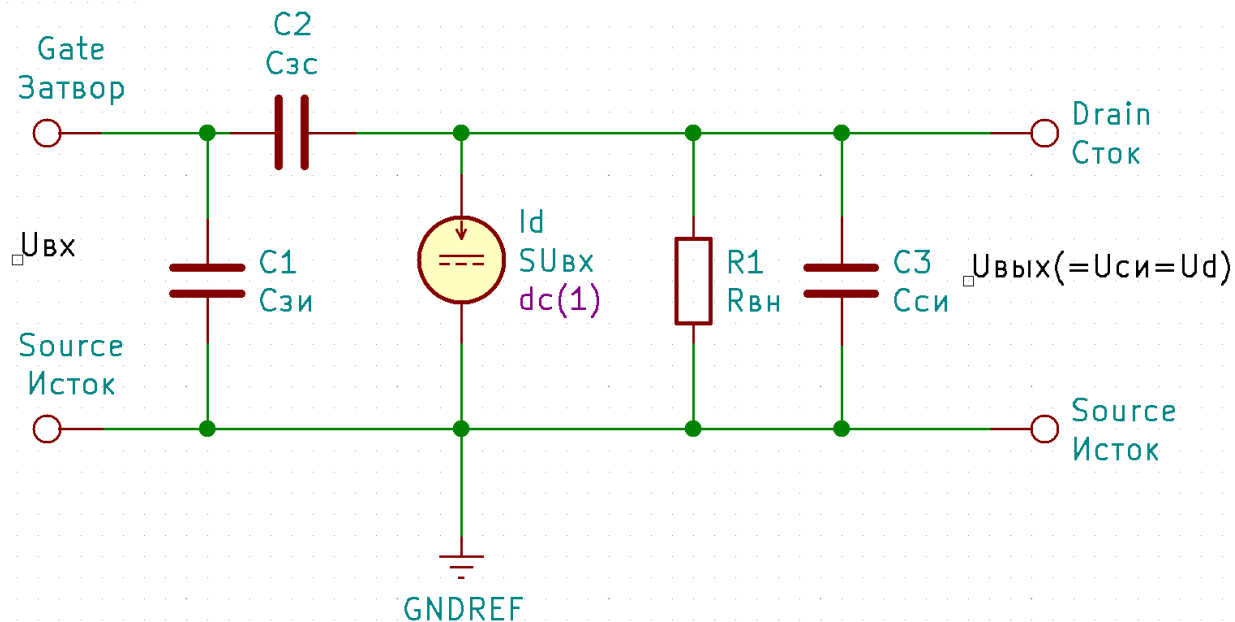
Эквивалентные схемы ПТУП



НЧ

$R_{вн}$ – внутреннее сопротивление

ВЧ



$C_{зи}$, $C_{зс}$, $C_{си}$ – межэлектродные ёмкости из-за слоёв обеднения, геометрии

Транзистор с изолированным затвором

Паразитное сопротивление затвор-сток в ПТУП приводит к большим (относительно) токам утечки → надо увеличить сопротивление. Например, добавить диэлектрик.

- МДП транзистор
- МДП (MOS) структура
- MOSFET транзистор

Полевой транзистор Хайля

В 1934 г. немецкий изобретатель **Оскар Хайль (Oskar Heil)** предложил свой вариант полевого транзистора, а в 1935 г. в Англии получил патент на него

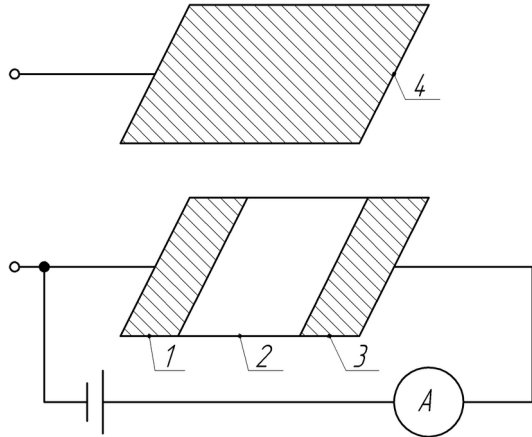


Иллюстрация из патента на полевой транзистор О. Хайля №439457 (1935 г.). Прототип полевого транзистора с изолированным затвором

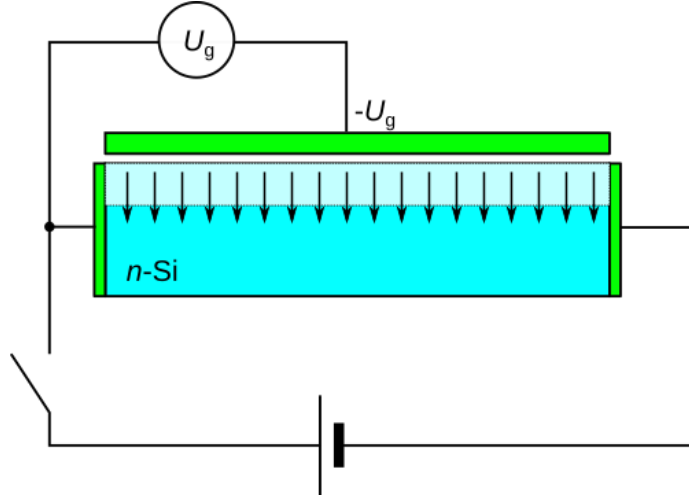
Оскар Хайль (Oskar Heil)

(20 марта 1908, Лангвиден, Рейнланд-Пфальц — 15 мая 1994, Сан-Матео) — немецкий инженер-электрик и изобретатель.

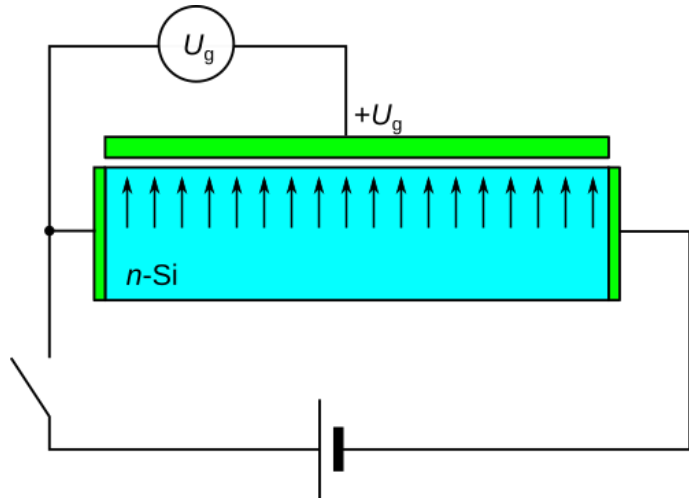
Изучал физику, химию, математику и музыку в Гёттингенском университете и получил докторскую степень в 1933 году за работы по молекулярной спектроскопии.

Изобрел технологию аудио колонок «преобразователь движения воздуха», ставшую известной благодаря динамике amt1 компании ESS в начале 1970-х годов.

Полевой транзистор Хайля



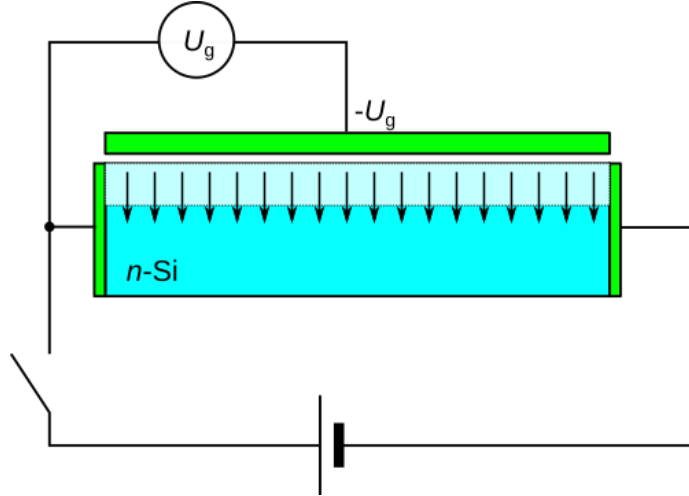
Прототип полевого транзистора с изолированным затвором.



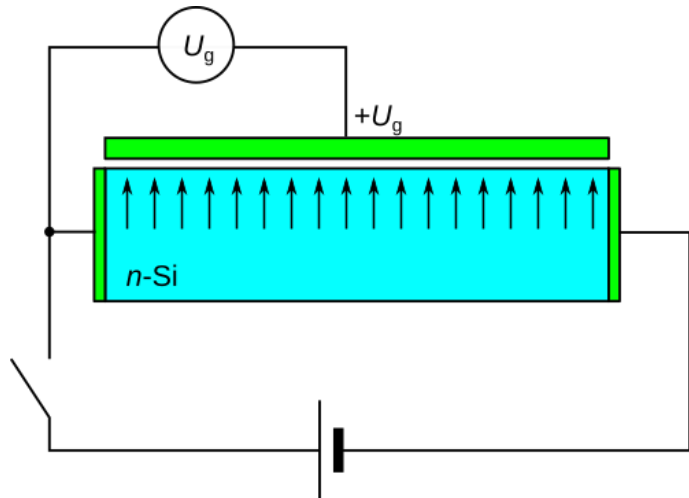
При приложении напряжения к конденсатору к поверхности приходят или уходят электроны, образуя область обогащения или обеднения.

В итоге сопротивления п/п изменяется.

Полевой транзистор Хайля



Прототип полевого транзистора с изолированным затвором.



При приложении напряжения к конденсатору к поверхности приходят или уходят электроны, образуя область обогащения или обеднения.

В итоге сопротивления п/п изменяется.

Идея так и не была реализована.

Причина: **поверхностные состояния**.

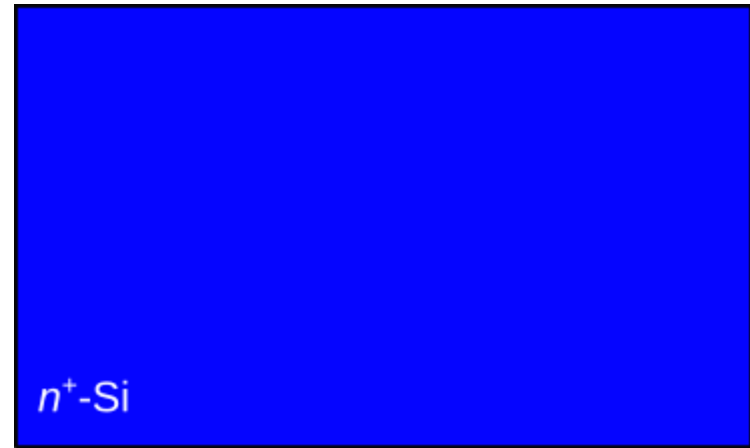
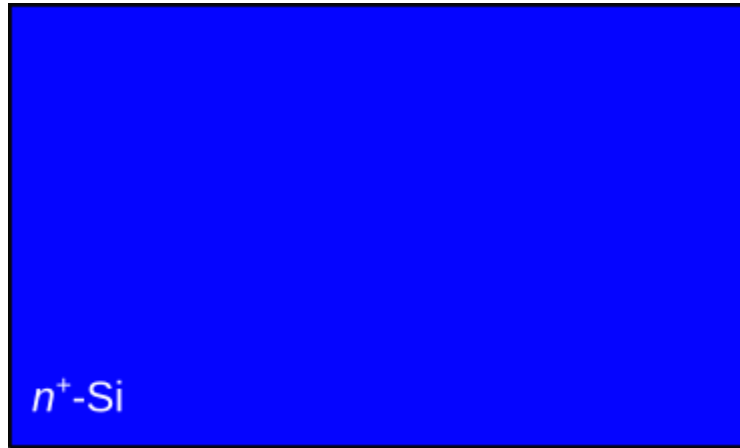
МДП транзистор

Паразитное сопротивление затвор-сток в ПТУП приводит к большим (относительно) токам утечки → надо увеличить сопротивление. Например, добавить диэлектрик.

При приложении напряжения к конденсатору к поверхности приходят или уходят электроны, образуя область обогащения или обеднения.

В итоге сопротивления п/п изменяется.

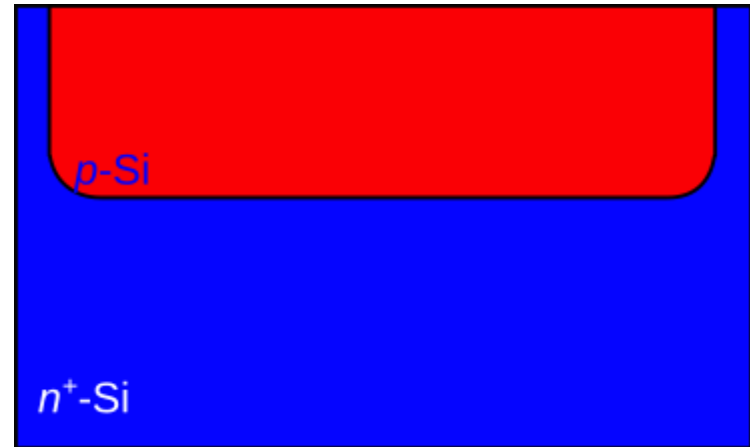
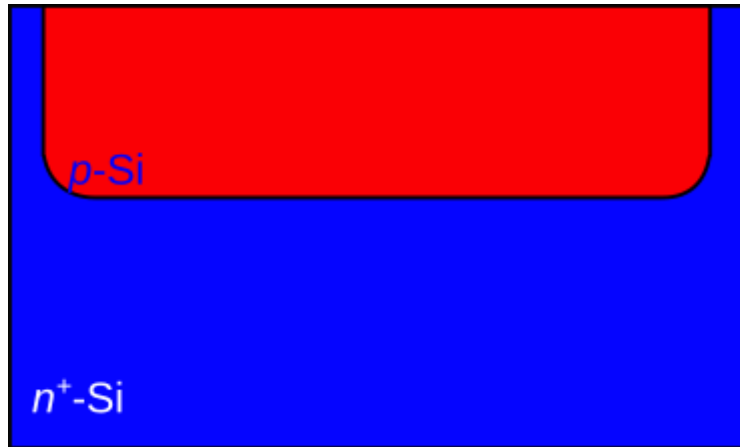
МДП транзистор



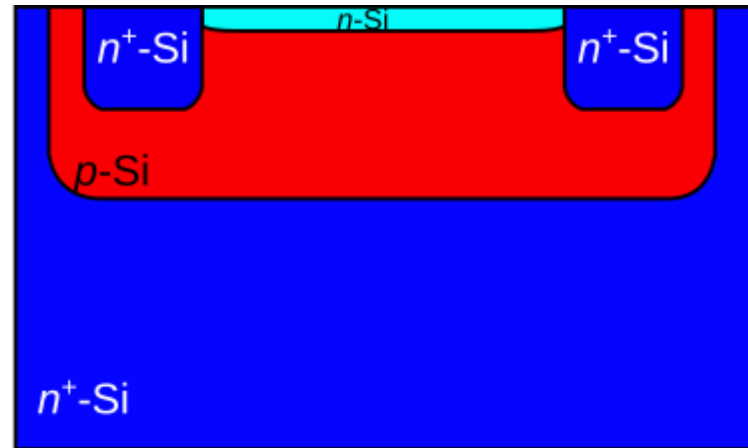
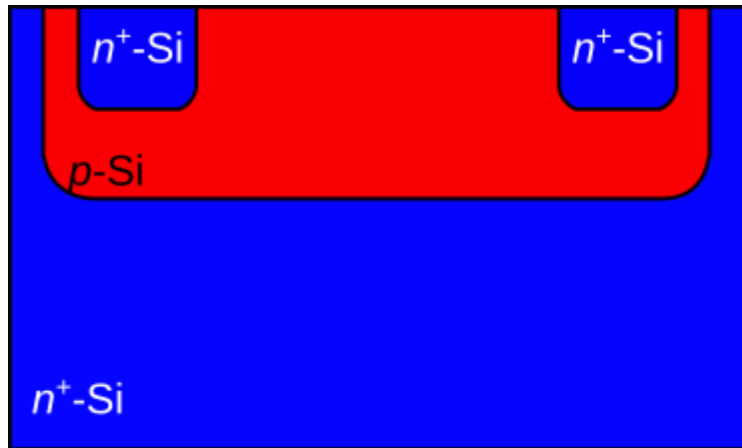
МДП транзистор



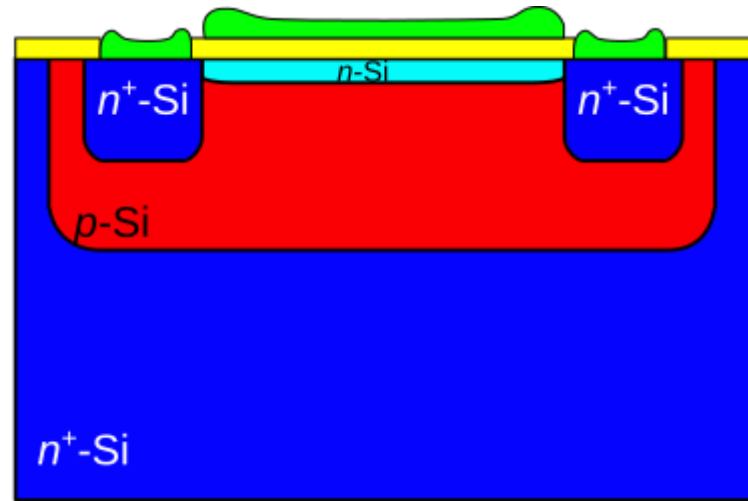
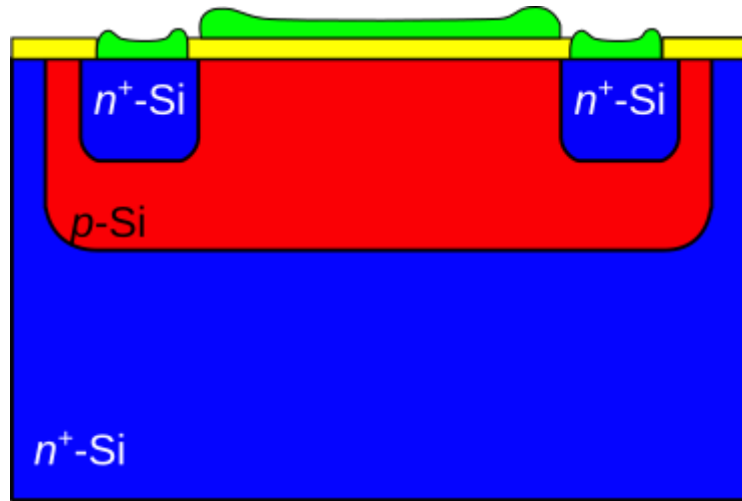
МДП транзистор



МДП транзистор

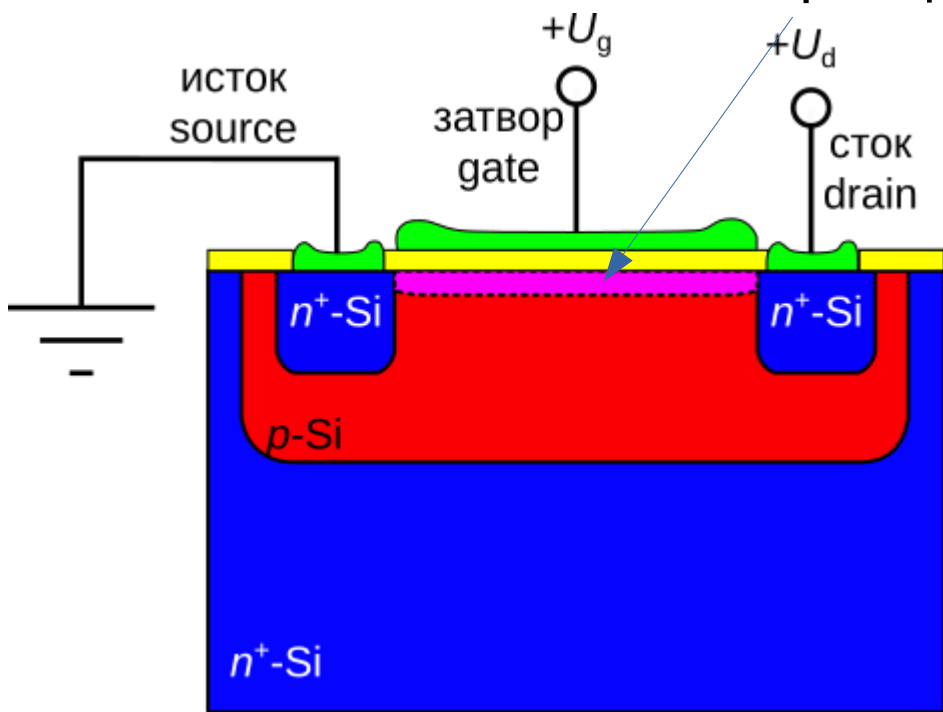


МДП транзистор



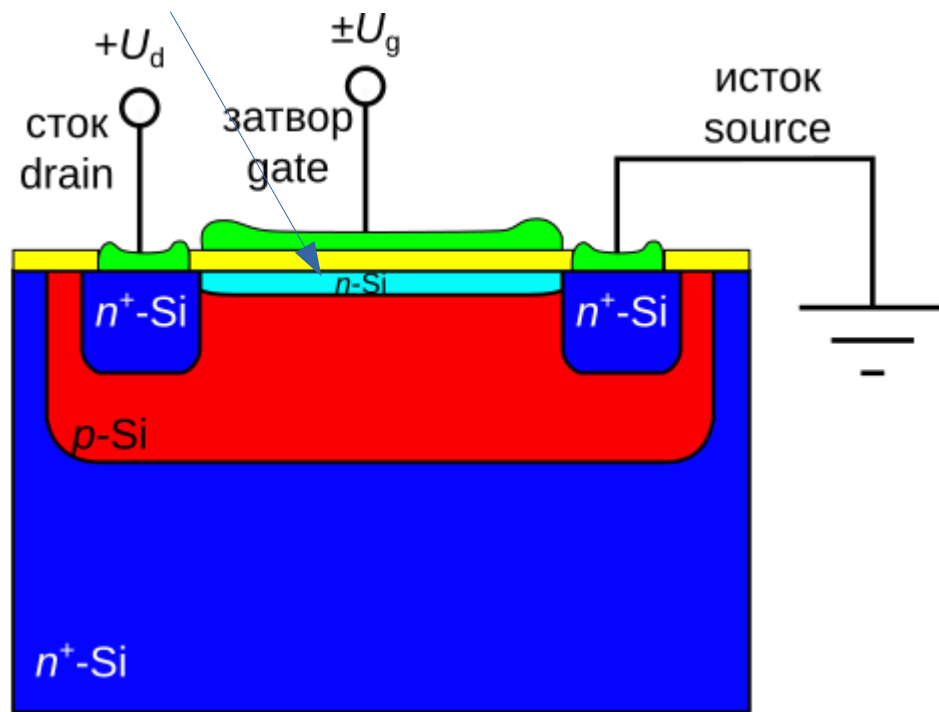
МДП транзистор

Проводящий канал



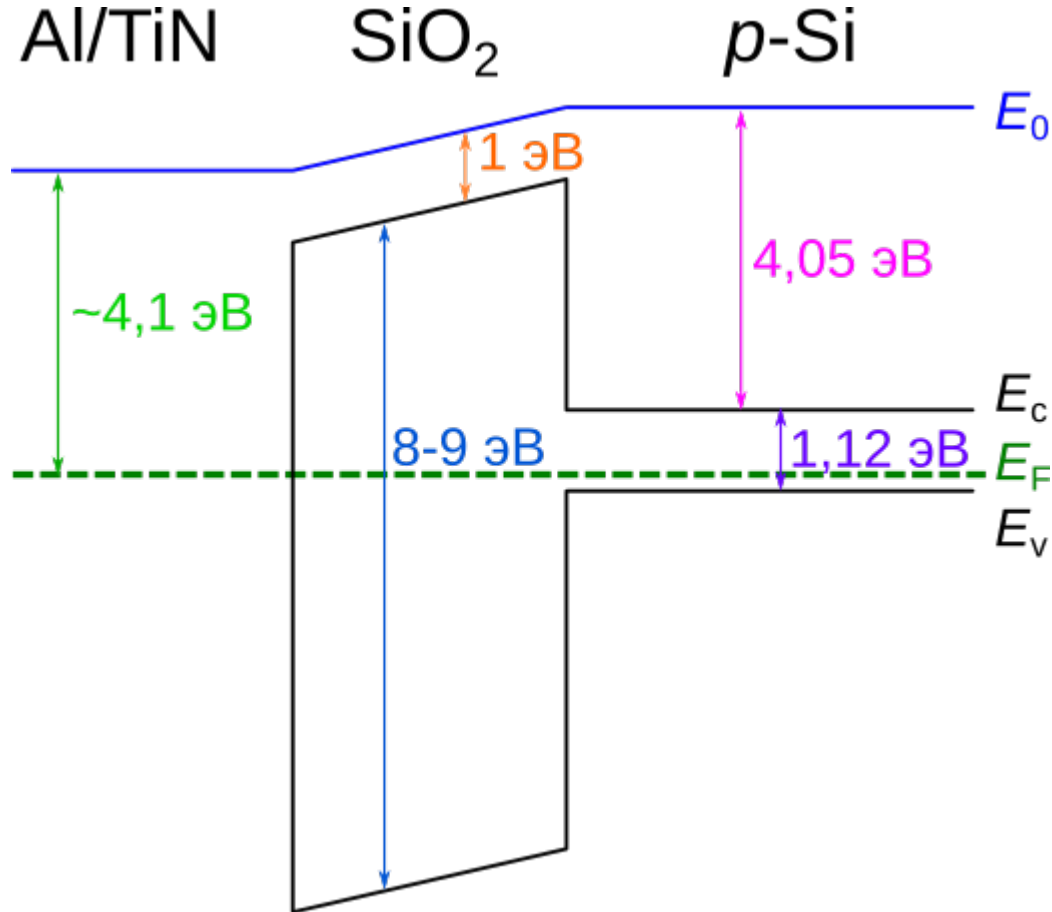
$$np = n_i^2$$
$$n > 0$$

МДП транзистор с
индуцированным
каналом



МДП транзистор с
встроенным
каналом

МДП транзистор с индуцированным каналом

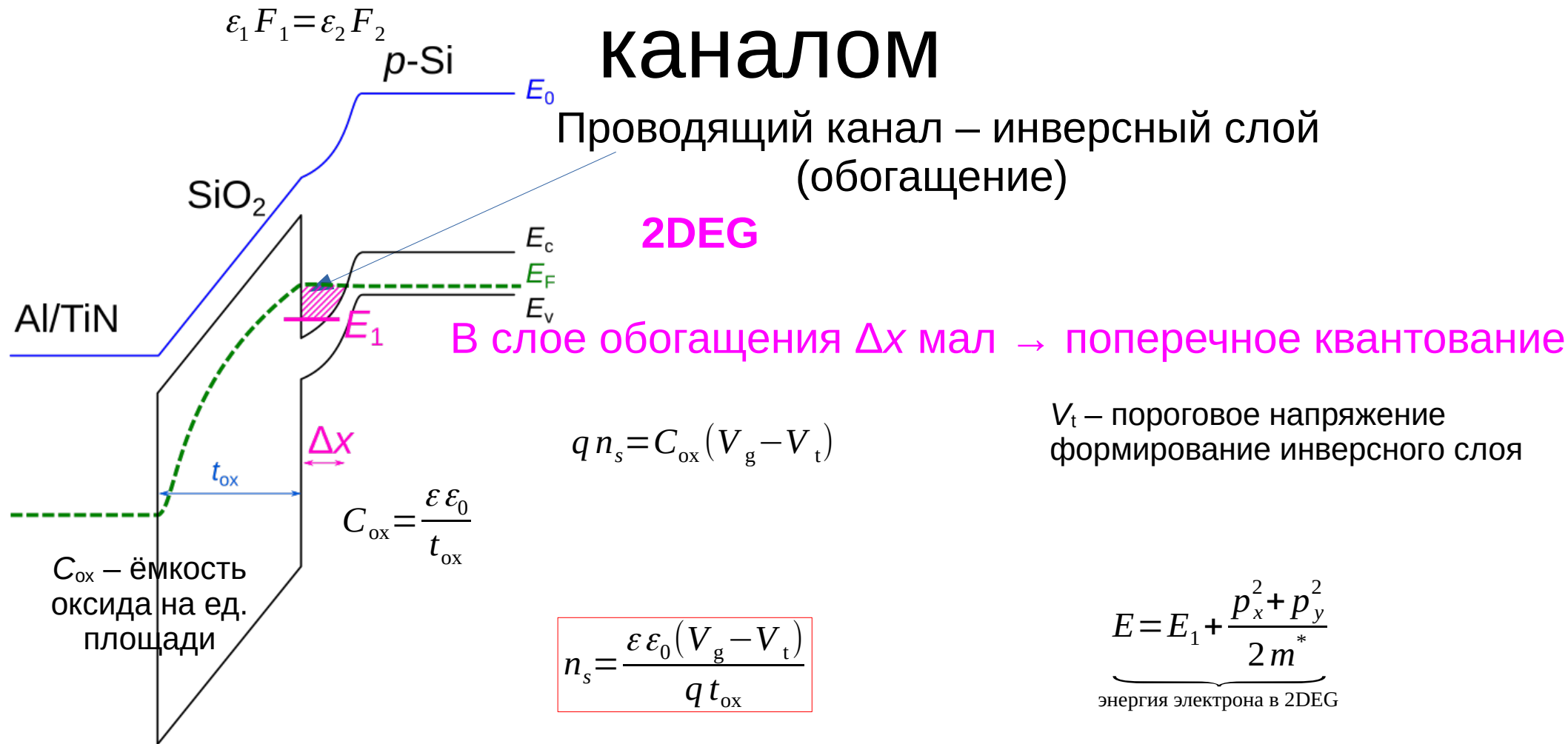


МДП структура при нулевом смещении

$$\varepsilon(\text{SiO}_2) = 3,9$$

$$\varepsilon(\text{Si}) = 11,7$$

МДП транзистор с индуцированным каналом



Ёмкость МДП структур. ВФХ

p -Si/SiO₂/Me: • $V_g < 0$ – обогащение, $C = \text{const} = C_{\text{ox}}$

• $V_g = 0$?

• $V_g > 0$ – обеднение, $C \ll C_{\text{ox}}$, $C \approx 0$

• $V_g > V_t$ – инверсия, $C \approx C_{\text{ox}}$

$$x_d \sim 100 \text{ нм}$$

$$C_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_{\text{SiO}_2} \epsilon_0}{t_{\text{ox}}}$$

$$C_{\text{ОПЗ}} = \frac{\epsilon_{\text{Si}} \epsilon_0}{x_d}$$

$$\frac{1}{C_d} = \frac{1}{C_{\text{ox}}} + \frac{1}{C_{\text{ОПЗ}}} \Rightarrow C_d = \frac{C_{\text{ox}} C_{\text{ОПЗ}}}{C_{\text{ox}} + C_{\text{ОПЗ}}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{SiO}_2} \epsilon_{\text{Si}} \frac{1}{t_{\text{ox}}} \frac{1}{x_d}}{\frac{\epsilon_{\text{SiO}_2}}{t_{\text{ox}}} + \frac{\epsilon_{\text{Si}}}{x_d}} \approx \frac{\cancel{\epsilon_0 \epsilon_{\text{SiO}_2}} / \cancel{t_{\text{ox}}} \epsilon_{\text{Si}} / x_d}{\cancel{\epsilon_{\text{SiO}_2}} / \cancel{t_{\text{ox}}}} \approx \frac{\epsilon_{\text{Si}} \epsilon_0}{x_d} = C_{\text{ОПЗ}} \ll C_{\text{ox}}$$

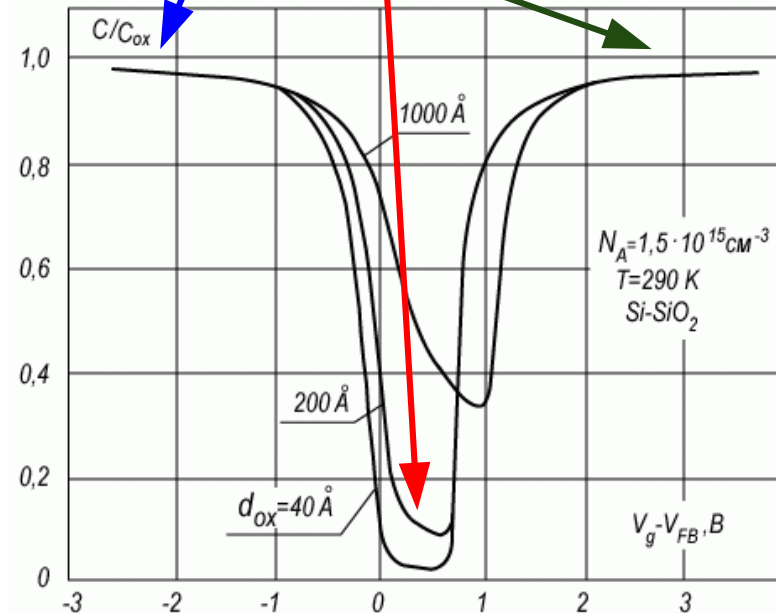
Ёмкость МДП структур. ВФХ

- $p\text{-Si/SiO}_2/\text{Me}$:
- $V_g < 0$ – **обогащение**, $C = \text{const} = C_{\text{ox}}$
 - $V_g > 0$ – **обеднение**, $C \ll C_{\text{ox}}$, $C \approx 0$
 - $V_g > V_t$ – **инверсия**, $C \approx C_{\text{ox}}$

$$C_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_{\text{SiO}_2} \epsilon_0}{t_{\text{ox}}}$$

$$C_{\text{опз}} = \frac{\epsilon_{\text{Si}} \epsilon_0}{\chi_d}$$

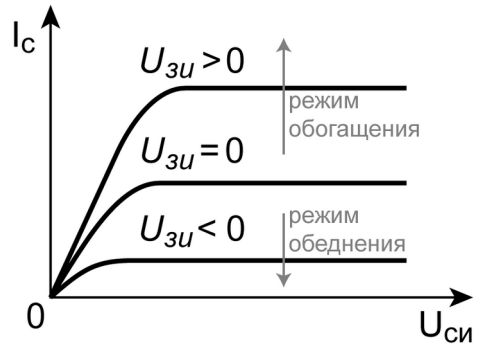
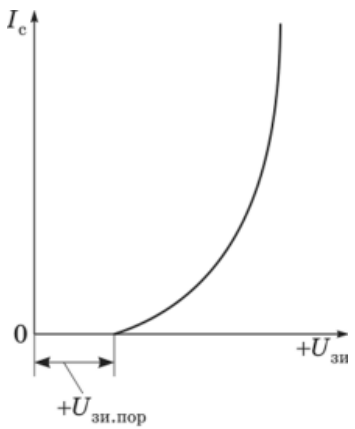
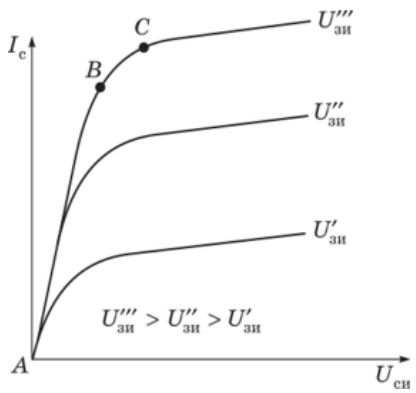
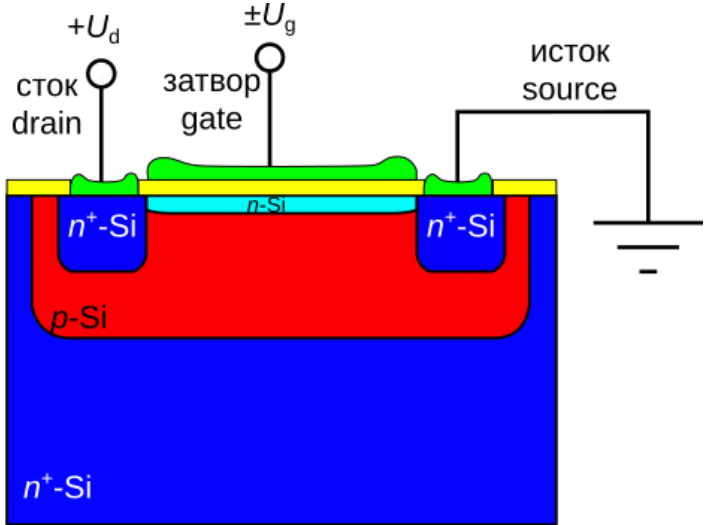
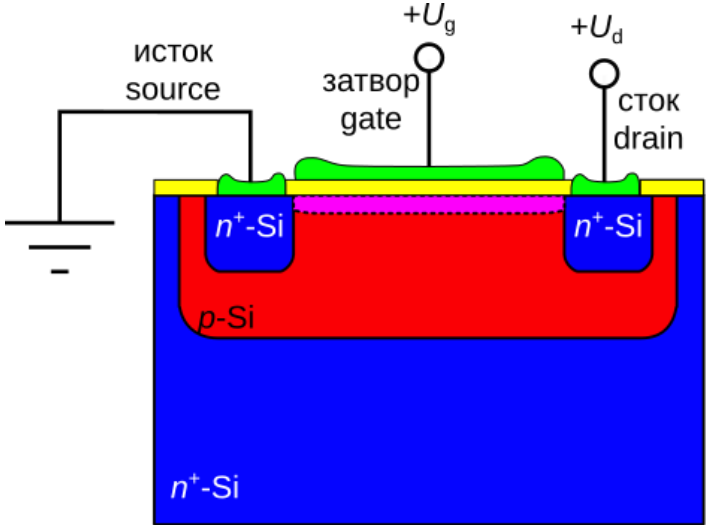
$$C_d \approx C_{\text{опз}} \ll C_{\text{ox}}$$



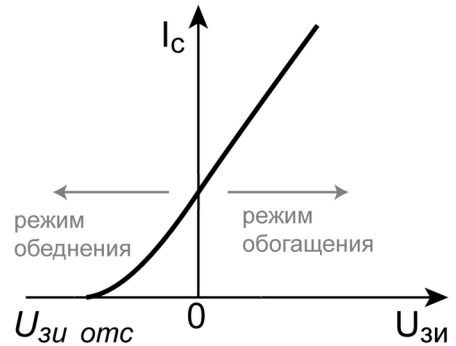
МДП транзистор с индуцированным каналом

МДП транзистор

МДП транзистор с встроенным каналом



a)

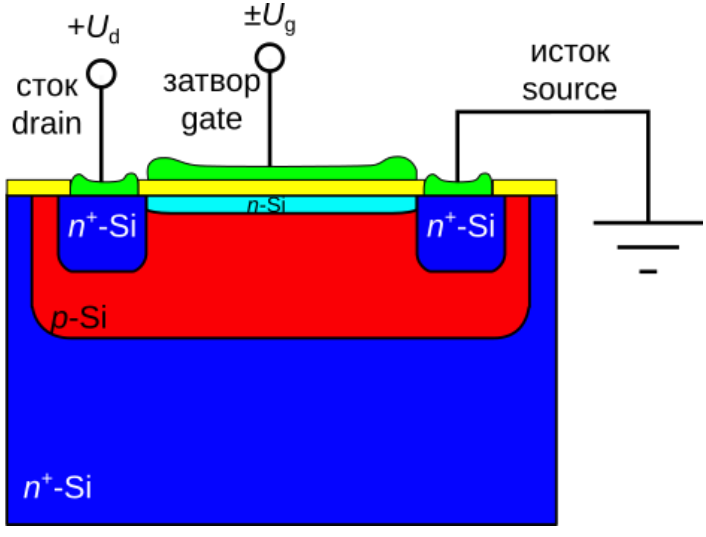
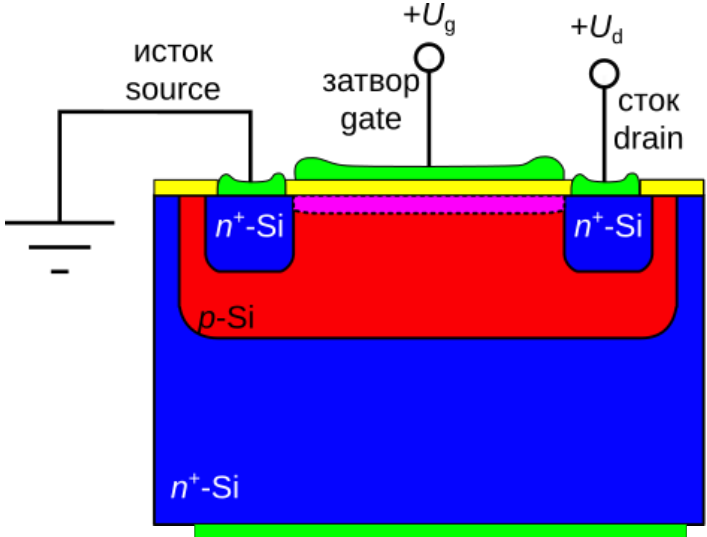


b)

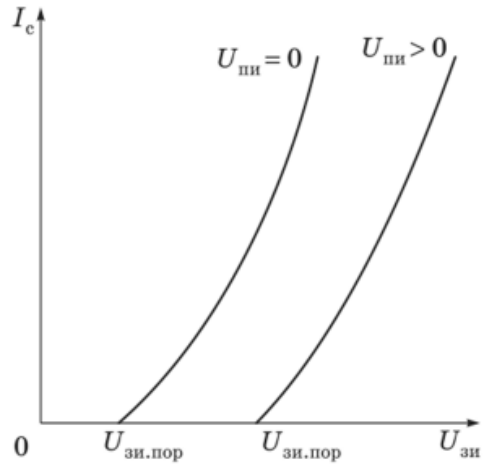
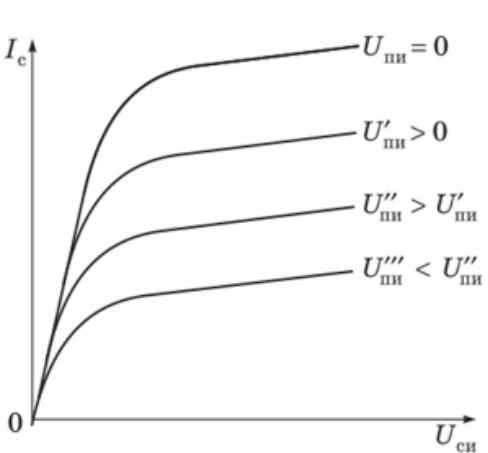
МДП транзистор с индуцированным каналом

МДП транзистор

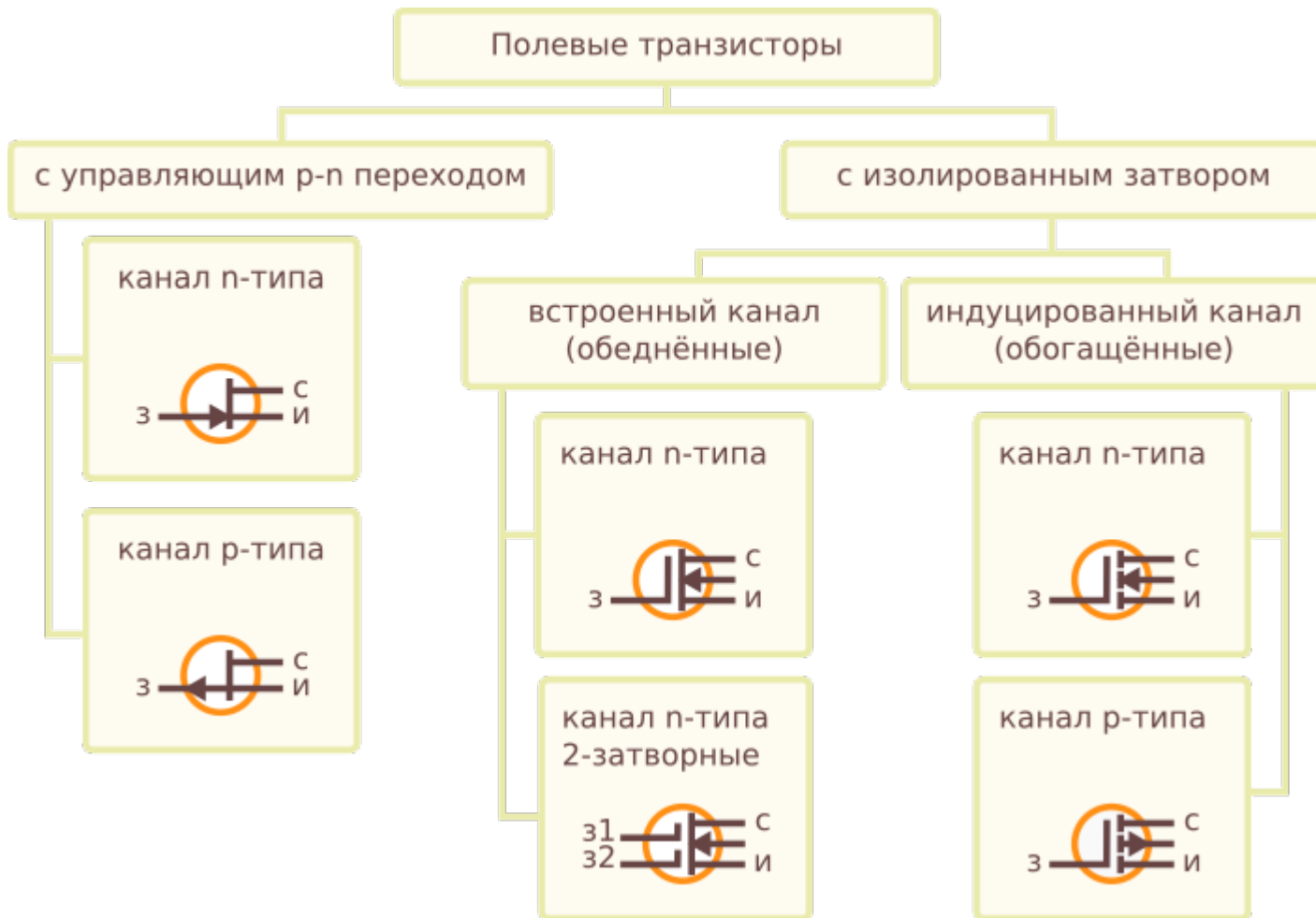
МДП транзистор с встроенным каналом



$U_{\text{п}} > 0$



Полевые транзисторы



КМОП – комплементарная пара

1963 г. Фрэнк Вонлас из «Fairchild Semiconductors» продемонстрировал КМОП пару.

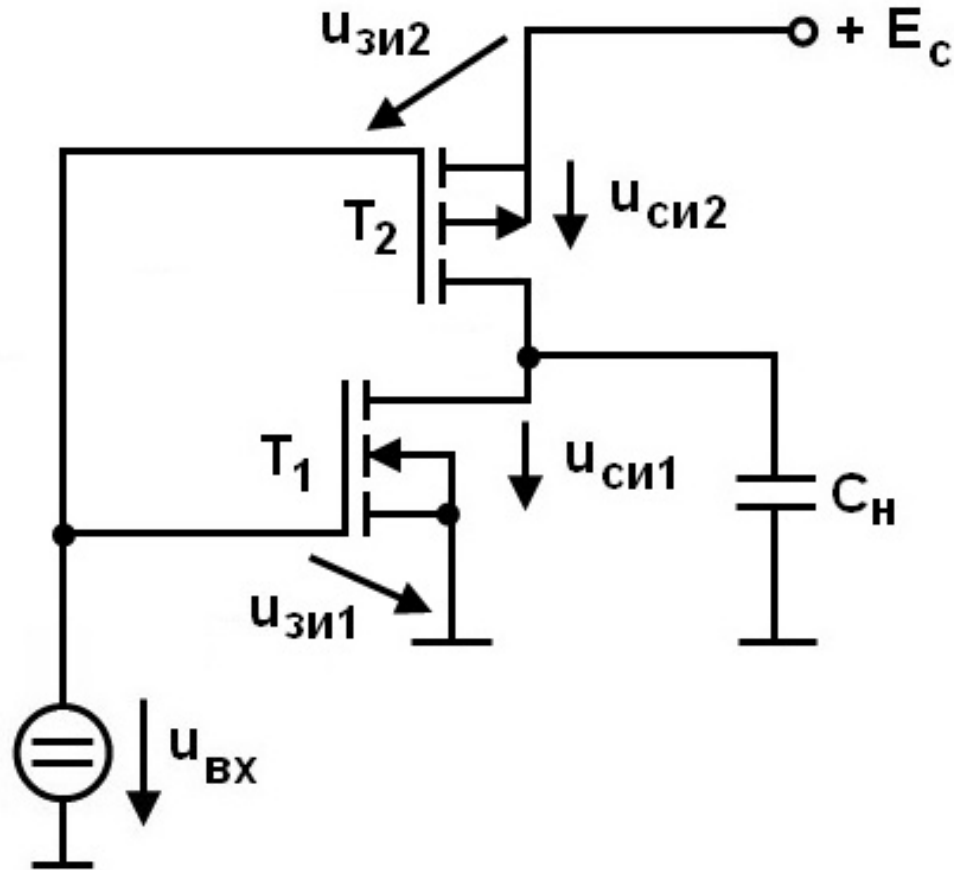
1968 г. первая КМОП микросхема.

Энергосберегающая, но медленная альтернатива ТТЛ, ДТЛ, ДДЛ.

Применение: наручные часы, калькуляторы и другие приборы на батарейках.

1990 г. КМОП выигрывает гонку у ТТЛ за счёт степени интеграции и низкого энергопотребления.

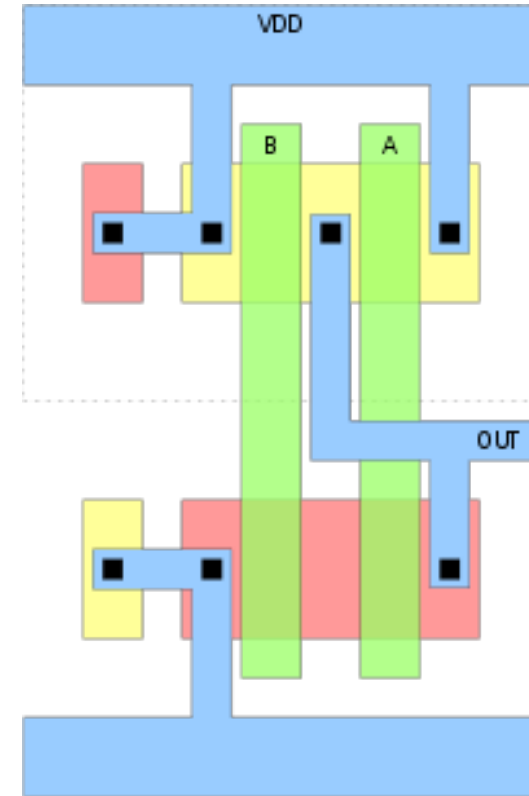
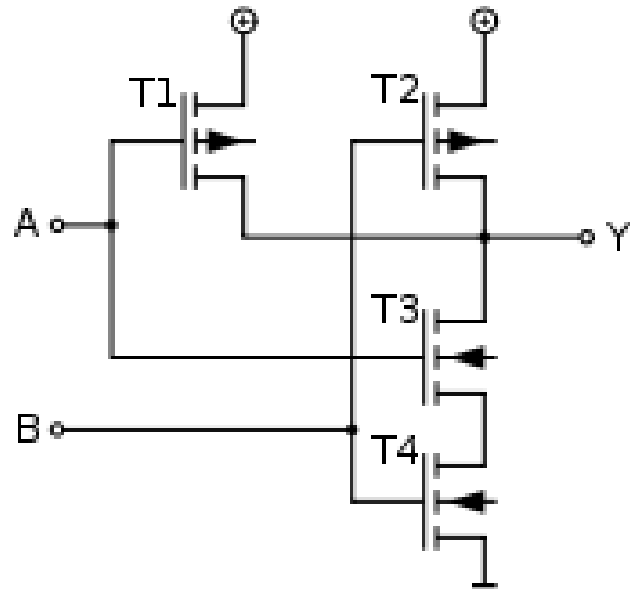
КМОП инвертор



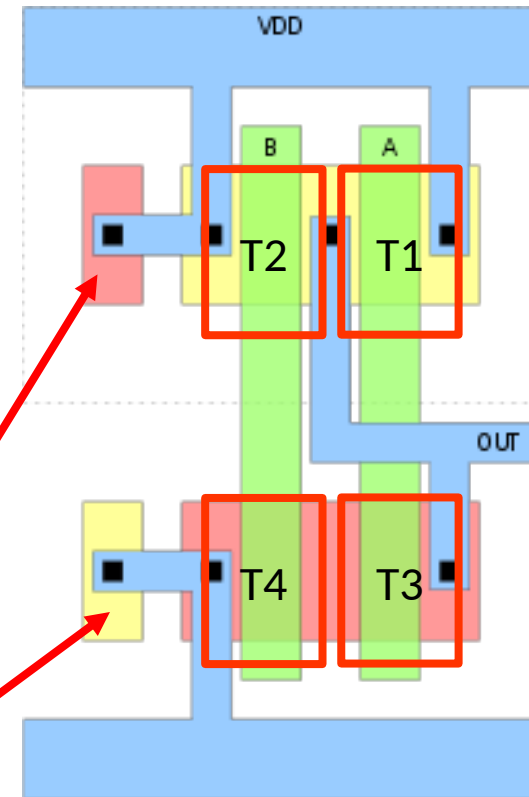
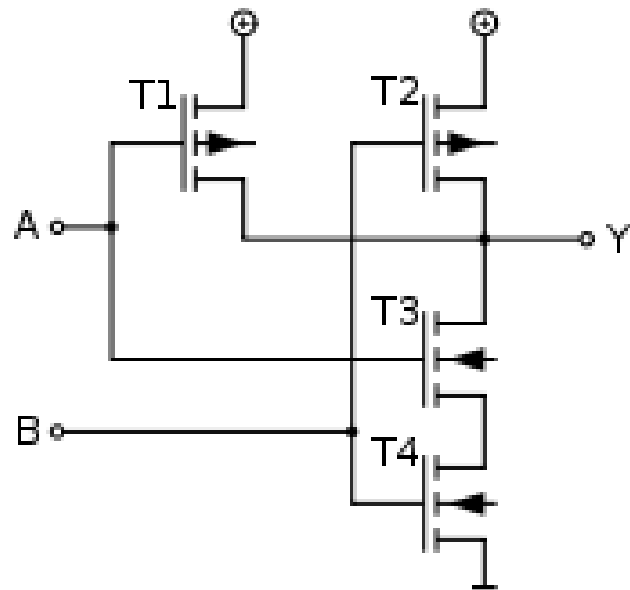
Токи у цепях $+E_c$ и земли:

- малы во время работы
- существенны во время переключения из-за перезарядки емкостей и формирования каналов

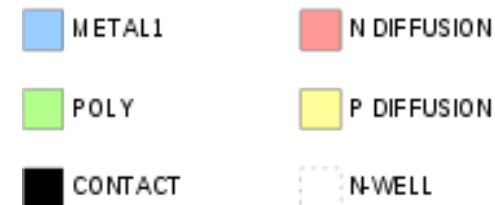
КМОП 2И-НЕ



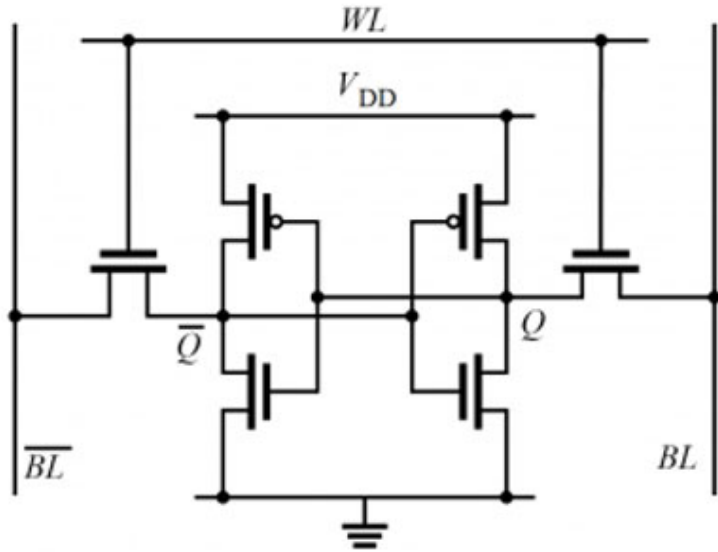
КМОП 2И-НЕ



«Карманы» справа нужны для
обратного смещения p - n
переходов под транзисторами



KMOП SRAM



	Category 1	Category 2	Category 3	Category 4	Category 5
Layouts of Inverters					
Layouts of SRAM Cells	 Type-1a cell Type-1b cell	 Type-2 cell	 Type-3 cell	 Type-4 cell	 Type-5 cell