

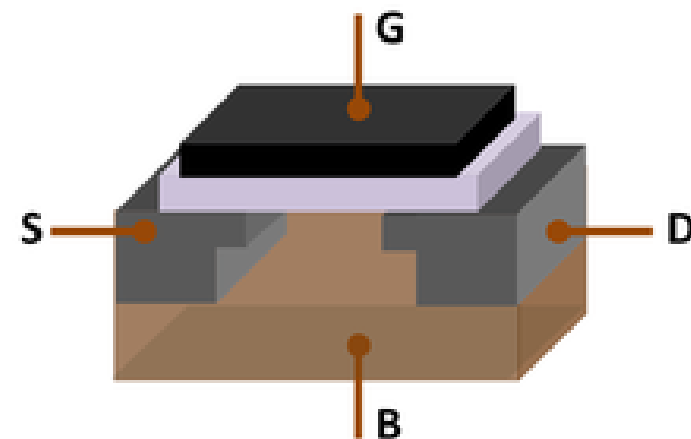
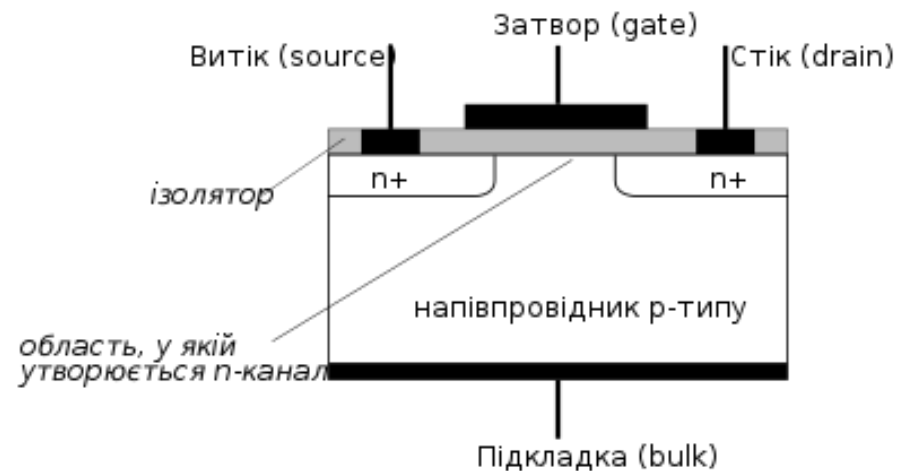
Лекція

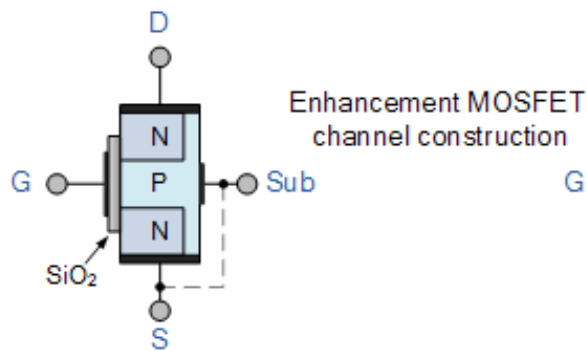
# Польові транзистори

## Ч.2. MOSFET

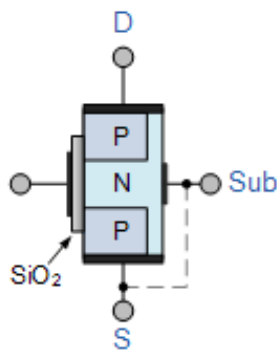
**Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET, MOS-FET, or MOS FET), also known as the metal-oxide-silicon transistor (MOS transistor, or MOS).** Дещо рідше використовується термін IGFET (isolated gate).

Типовий МДН-транзистор складається з МД/ОН-структури (метал-діелектрик/оксид-напівпровідник, наприклад n- типу), та двох p- кишень для електродів джерела (source) та стоку (drain). Металічний керуючий електрод називається затвором (gate), а напівпровідниковий – підкладкою (bulk, body). Відомо, що МДН-структури мають три режими роботи: збагачення або акумуляції (з власною провідністю напівпровідника); слабкої інверсії (зі змішаною провідністю) та сильної інверсії (з інверсною провідністю).



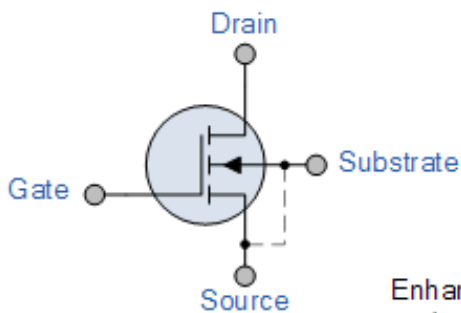


Enhancement MOSFET channel construction

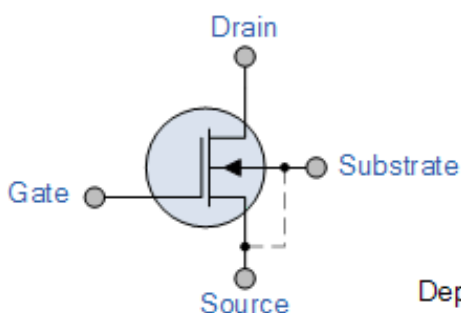
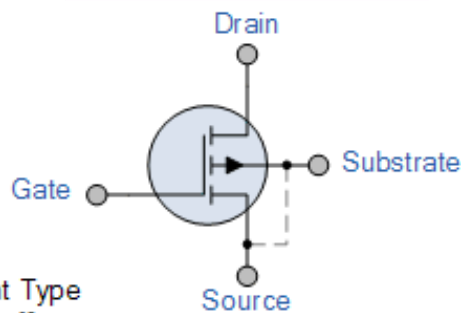


P-channel MOSFET

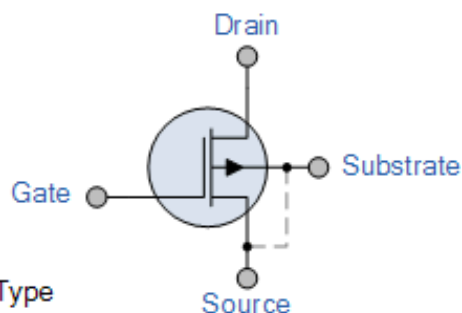
N-channel MOSFET



Enhancement Type (normally-off)

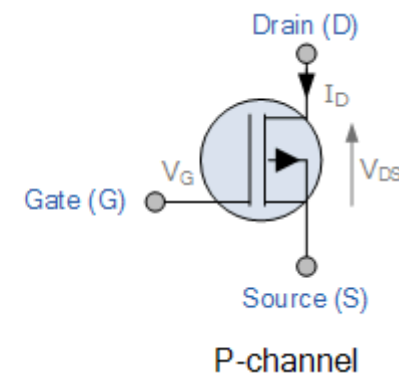
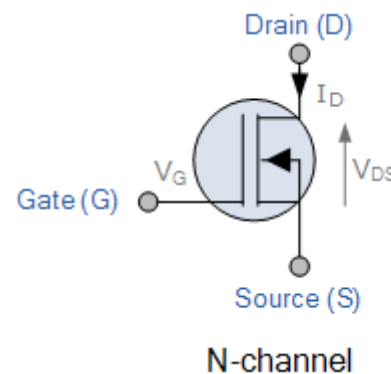
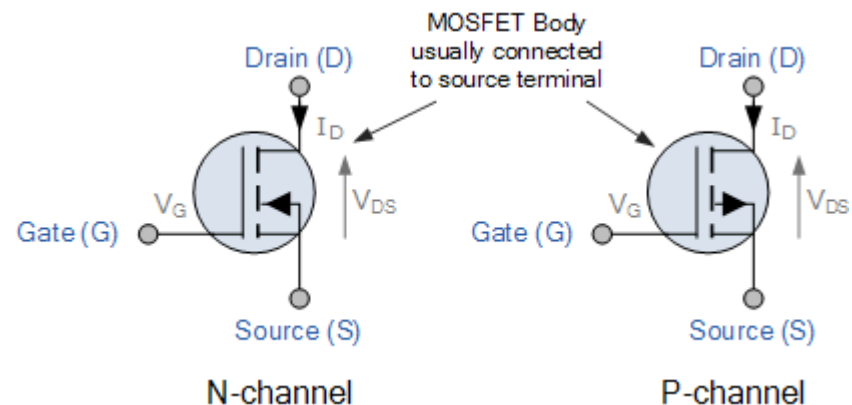


Depletion Type (normally-on)

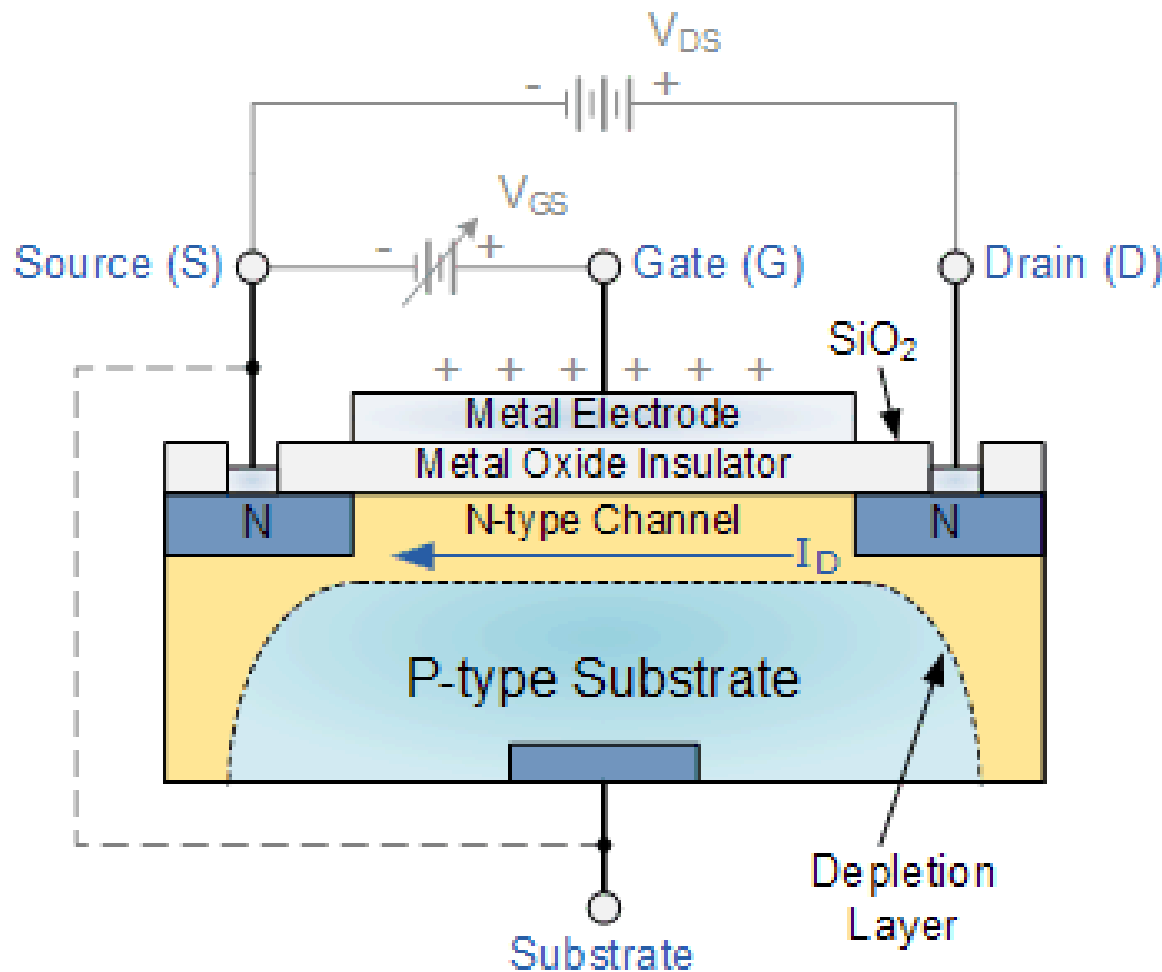


**Depletion mode** - збіднений, власний, вбудований канал.

**Enhancement mode** - збагачений, індукований, інверсний канал.



Конструкція MOSFET суттєво відрізняється від конструкції JFET. В обох типах каналів (збагачених, збіднених) використовують електричне поле, створене напругою на затворі, щоб змінити потік носіїв заряду (електронів для  $n$ -каналу або дірок для  $p$ -каналу), через напівпровідниковий канал стік-витік. Електрод затвора розміщений поверх дуже тонкого ізоляційного шару, а під електродами стоку та витіку є пара невеликих ділянок того ж типу, що і канал.

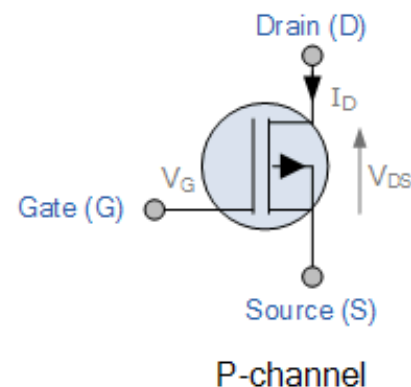
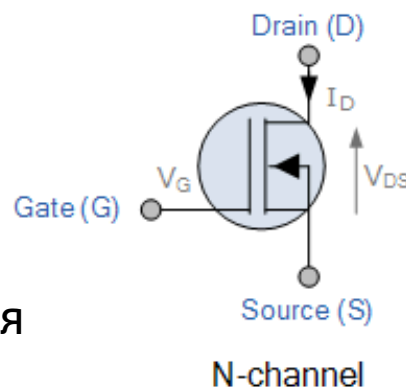


У цифровій та силовій техніці зазвичай застосовуються транзистори лише з індукованим каналом. У аналоговій техніці використовуються прилади обох типів.

# Depletion-mode MOSFET (збіднений)

MOSFET в режимі збіднення зустрічається рідше, ніж в режимі збагачення. Зазвичай він «увімкнений» (тобто проводить струм) без прикладення напруги зміщення до затвора. Тобто канал проводить, коли  $V_{GS} = 0$ , що робить його «нормально відкритим» пристроєм.

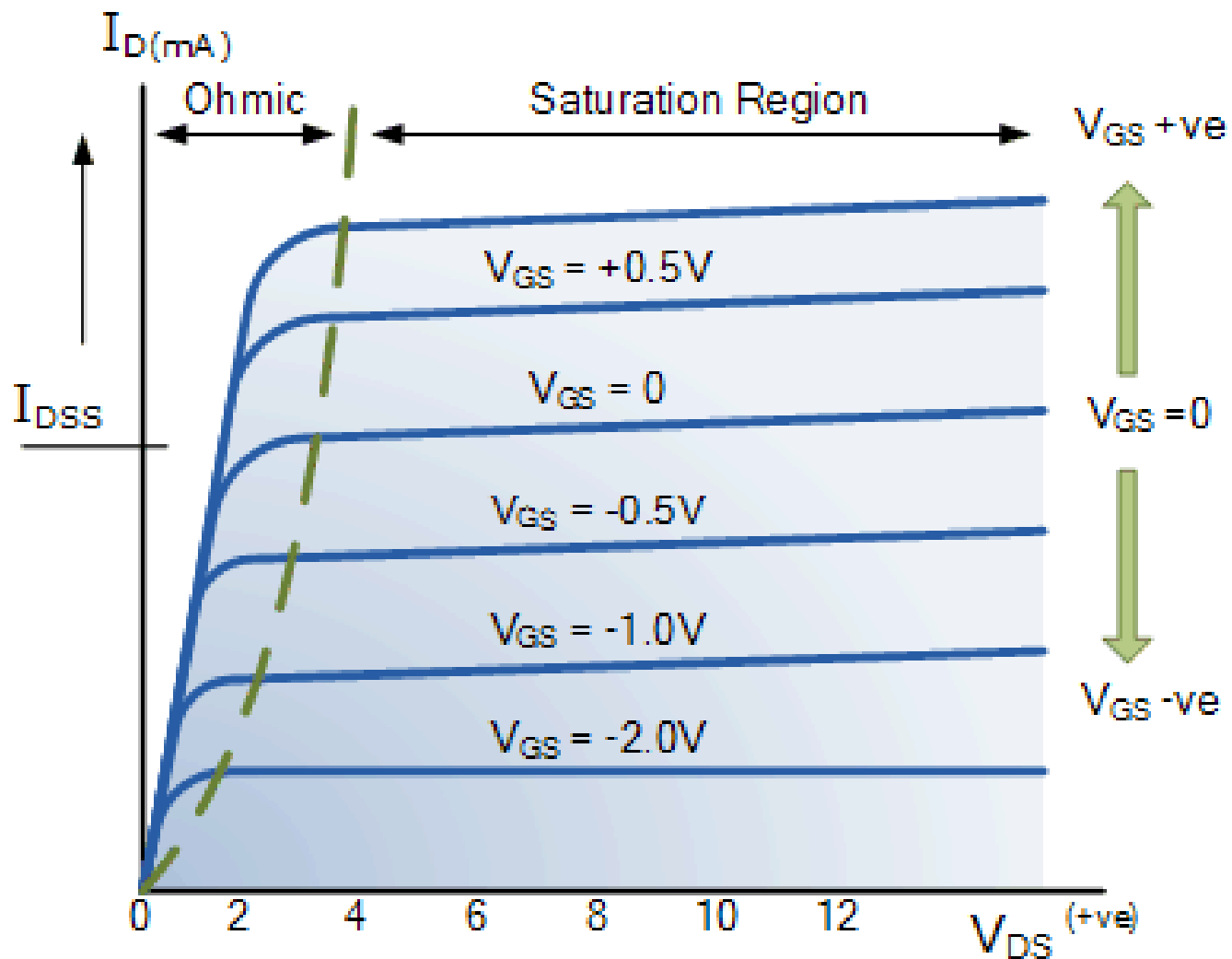
На УГП такого транзистора використовується суцільна лінія каналу для позначення нормально закритого провідного каналу.



Для МОН-транзистора із збідненим  $n$ -каналом, негативна напруга затвор-витік  $V_{GS}^-$  буде «збіднювати» (звідси його назва) провідний канал, тобто кількість вільних електронів у ньому буде зменшуватися, перемикаючи транзистор у режим «OFF». Аналогічно для транзистора із збідненим  $p$ -каналом позитивна напруга затвор-витік  $V_{GS}^+$  зменшує в каналі кількість вільних дірок, вимикаючи його.

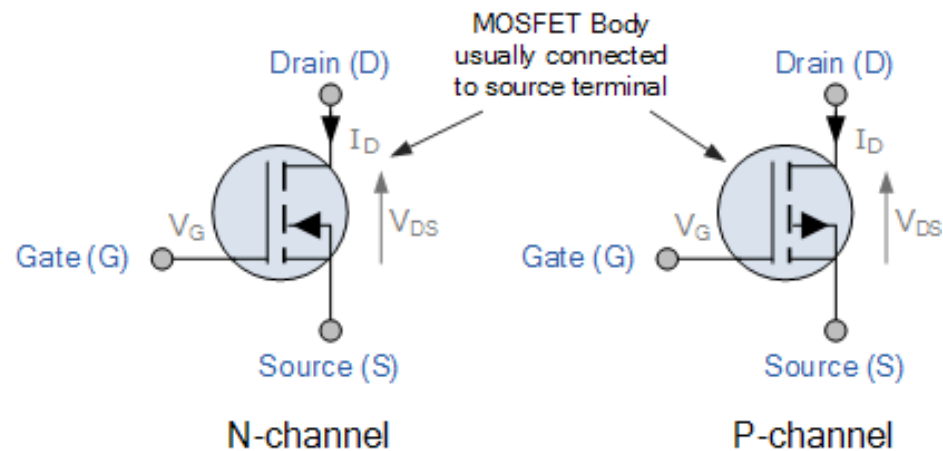
# Depletion-mode MOSFET (збіднений)

Іншими словами, для режиму збіднення в  $n$ -канальному MOSFET  $+V_{GS}$  означає більше електронів і більше струму. Тоді як  $-V_{GS}$  означає менше електронів і менше струму. Протилежне також вірно для типів  $p$ -каналів. Режим збіднення MOSFET еквівалентний «нормально замкненому» перемикачу.



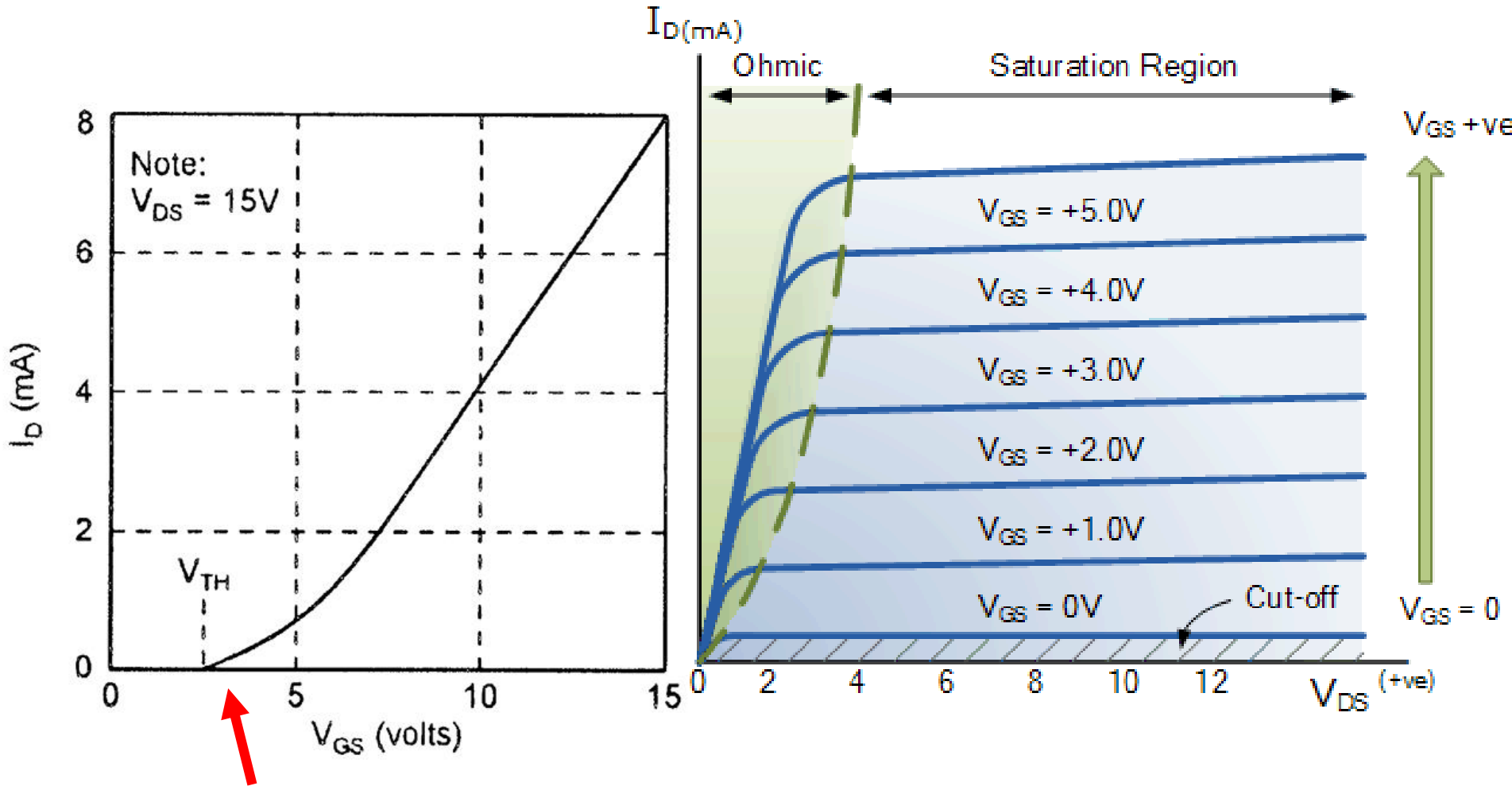
# Enhancement-mode MOSFET (збагачений)

Більш поширені MOSFETи в режимі збагачення (так звані еMOSFET) є протилежними режиму збіднення. Тут провідний канал злегка легований або навіть нелегований, що робить його непровідним. Це призводить до того, що пристрій зазвичай «OFF» (не проводить струм), коли напруга зміщення затвора  $V_{GS}$  дорівнює нулю. На УГП такого транзистора використовується розірвана лінія каналу для позначення нормально відкритого *непровідного* каналу.



Для n-канального збагаченого МОН-транзистора струм стоку буде протікати тільки тоді, коли напруга затвора ( $V_{GS}$ ) прикладена до затвора, що перевищує рівень порогової напруги (threshold voltage,  $V_{TH}$ ).

# Enhancement-mode MOSFET (збагачений)





Подавання позитивної ( $+V_e$ ) напруги на затворі до еMOSFET  $n$ -типу притягує більше електронів до оксидного шару навколо затвора, тим самим збільшуючи (звідси його назва) товщину каналу, що дозволяє протікати більшому струму. Ось чому такий тип транзисторів називають пристроєм з режимом збагачення, оскільки збільшення напруги затвора збільшує провідність каналу.

Іншими словами, для  $n$ -канального збагаченого MOSFET:  $+V_{GS}$  вмикає транзистор, тоді як нуль або  $-V_{GS}$  вимикає транзистор. Таким чином, MOSFET в режимі збагачення еквівалентний «нормально-розімкнутому» перемикачу.

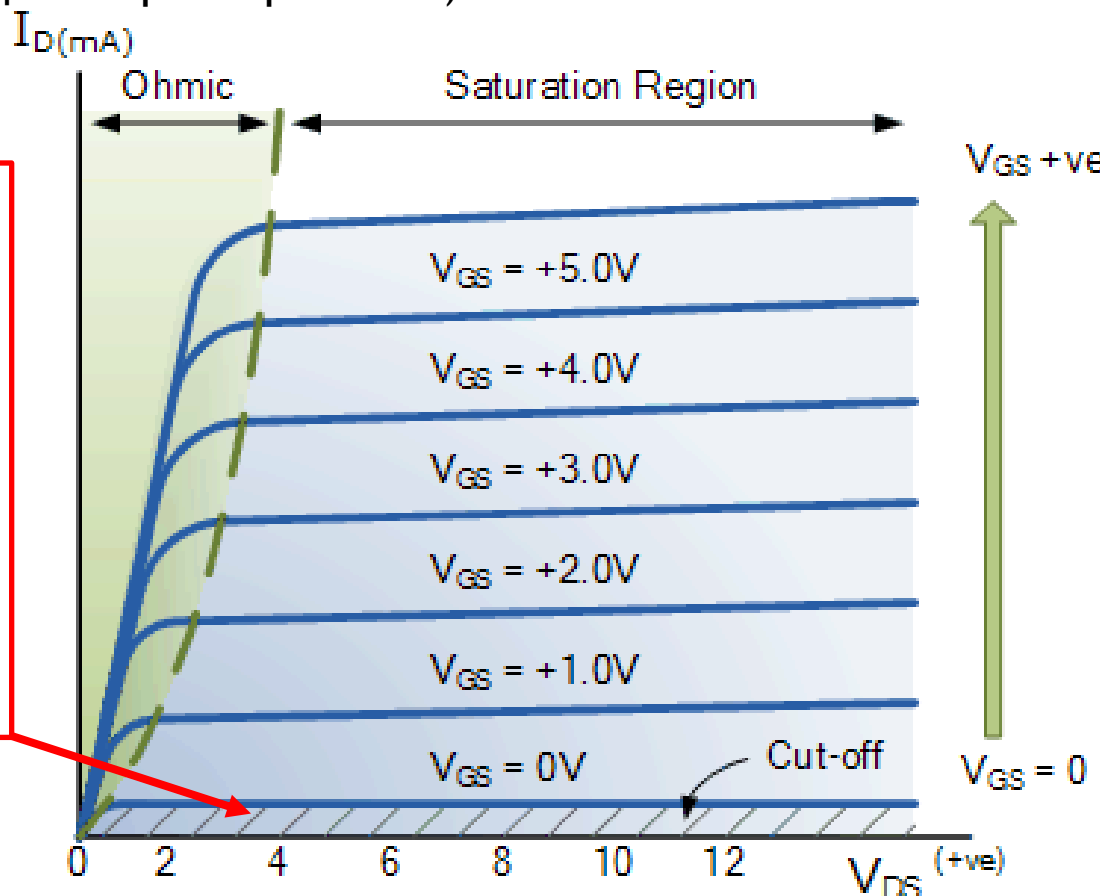
Протилежне також вірно для збагаченого МОН-транзистора з  $p$ -каналом. Коли  $V_{GS} = 0$ , пристрій вимкнено, а канал відкритий.  $+V_{GS}$  вимикає транзистор, а  $-V_{GS}$  вмикає транзистор.

Важливо: при цьому якщо транзистор закритий, полярність напруги на затворі не відповідає полярності каналу, то, на відміну від JFET - пробою затвору не відбувається (звичайно, якщо напруга  $V_{GS}$  не перевищує певного пробивного значення).

# Порівняльна таблиця різних типів MOSFET

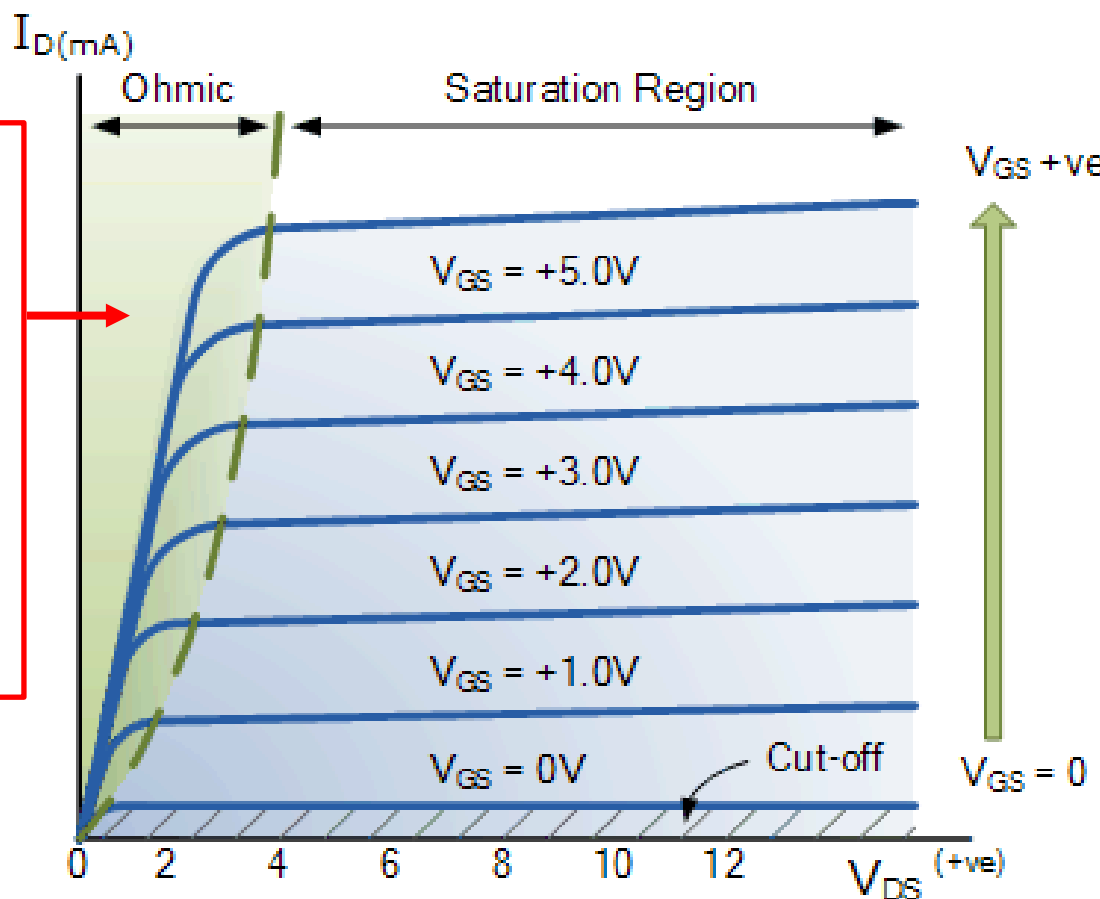
MOSFET type	$V_{GS} = +ve$	$V_{GS} = 0$	$V_{GS} = -ve$
N-Channel Depletion	ON	ON	OFF
N-Channel Enhancement	ON	OFF	OFF
P-Channel Depletion	OFF	ON	ON
P-Channel Enhancement	OFF	OFF	ON

Здатність MOSFET перемикатися між цими двома станами дозволяє йому виконувати дві основні функції: «перемикання» (цифрова електроніка) або «підсилення» (аналогова електроніка). Тоді MOSFET можуть працювати в трьох різних режимах (або областях вихідної характеристики):

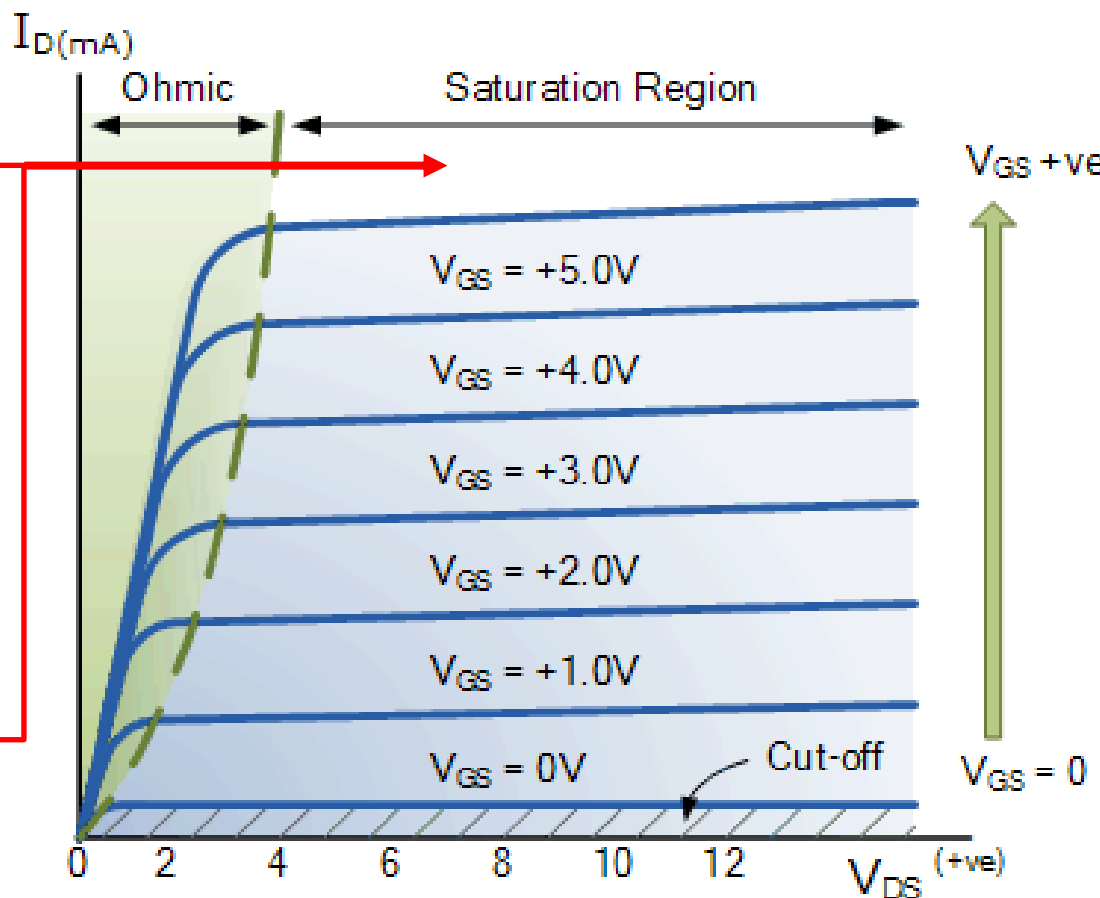


1. Область відсікання - з  $V_{GS} < V_{th}$  напруга затвор-витік набагато нижча, ніж порогова напруга транзисторів, тому MOSFET «повністю вимикається». Таким чином,  $I_D = 0$ , незалежно від значення  $V_{DS}$ .

2. Лінійна (омічна) область - тут  $V_{GS} > V_{th}$  та  $V_{DS} < V_{GS}$  транзистор перебуває в області постійного опору. Він поводить себе як опір, керований напругою, значення опору якого визначається напругою затвора, рівнем  $V_{GS}$ .

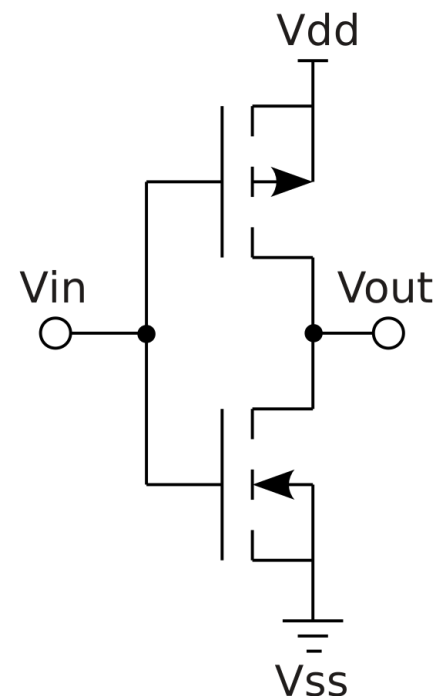


3. Область насичення - при  $V_{GS} > V_{th}$  та  $V_{DS} > V_{GS}$  транзистор знаходиться в області постійного струму  $i$ , отже, «повністю включений». Струму стоку  $I_D = \text{максимальний}$ .



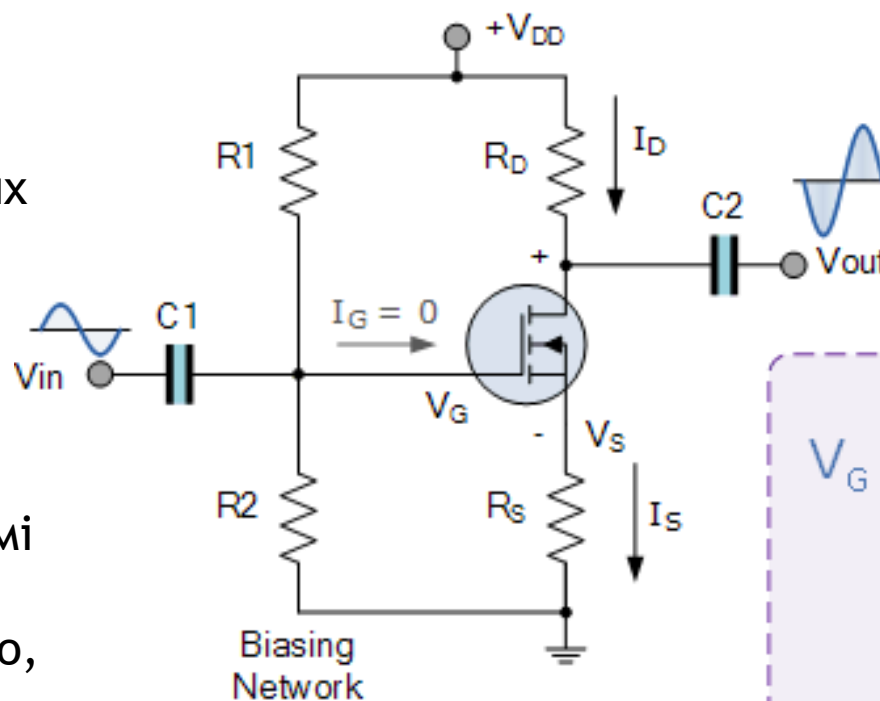
Чергування режимів насичення та відсікання - робота MOSFET у цифровій або силовій імпульсній електроніці.  
В аналоговій електроніці використовується винятково лінійній (омічний) режим роботи.

MOSFET в режимі збагачення працюють як чудові електронні перемикачі завдяки їх низькому опору «ON» і надзвичайно високому опору «OFF», а також їх нескінченно високому входному опору через їх ізольований затвор. МОН-транзистори із збагаченим каналом використовуються в інтегральних схемах для виробництва логічних вентилів типу CMOS і схем перемикання потужності у вигляді вентилів PMOS (*p*-канал) і NMOS (*n*-канал). CMOS фактично означає Complementary MOS, що означає, що логічний пристрій має як PMOS, так і NMOS у своїй конструкції.



# Підсилювач на MOSFET

Як і JFET, МОП-транзистори можна використовувати для створення однокаскадних схем підсилювача класу «А». При цьому *n*-канальний MOSFET із загальним витоком є найпопулярнішою схемою. MOSFET у режимі збіднення дуже схожий на JFET, за винятком того, що MOSFET має набагато більший вхідний опір.



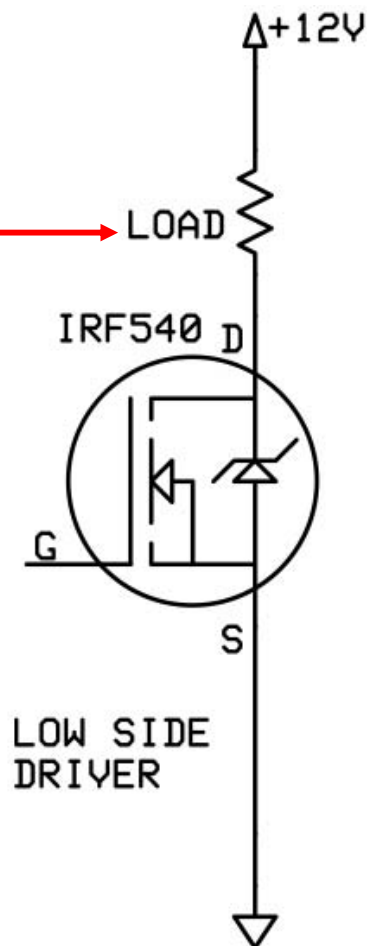
$$V_G = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD}$$

$$I_D = \frac{V_S}{R_S}$$

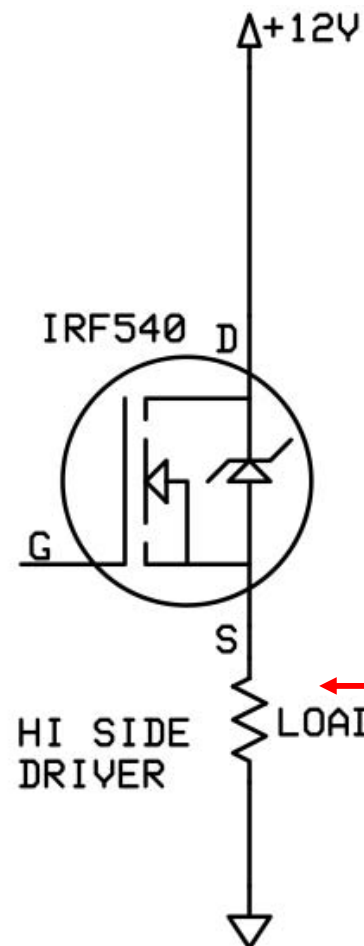
Цей високий вхідний опір контролюється резистивним дільником  $R_1$  і  $R_2$ , через який подається напруга зміщення затвора. Крім того, вихідний сигнал для підсилювача еMOSFET із загальним витоком інвертований відносно вхідного.

# Драйвери (джерела струму) на MOSFET

Якщо струм через навантаження повинен йти тоді, коли на вході низька напруга (інвертуюча схема)

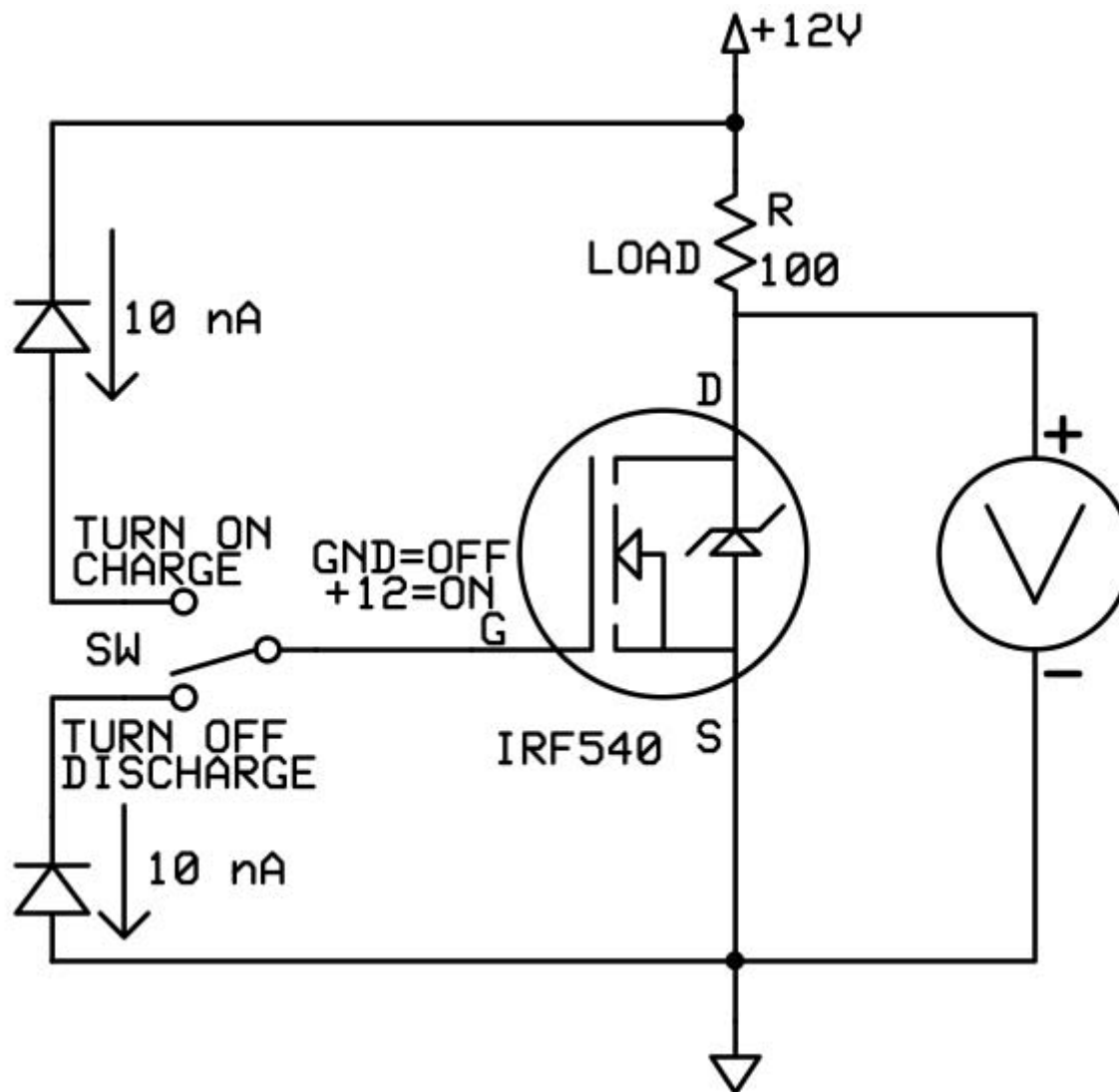


Якщо струм через навантаження повинен йти тоді, коли на вході висока напруга (неінвертуюча схема)

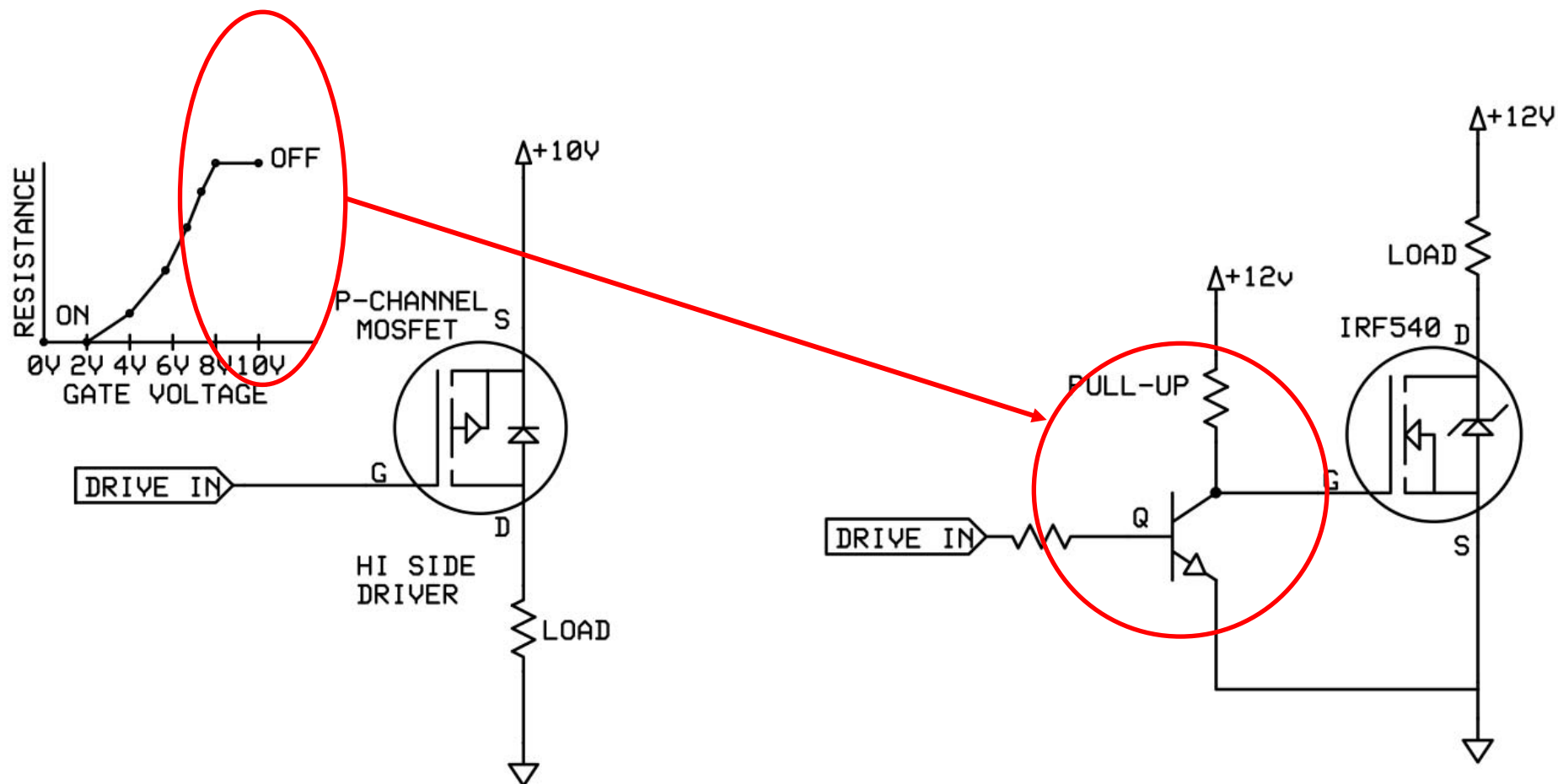




# Драйвери (джерела струму) на MOSFET

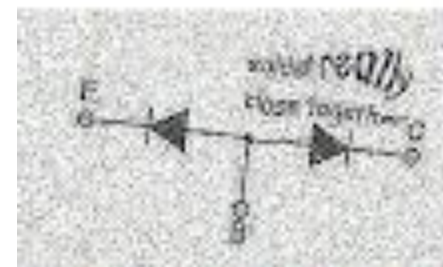


# Драйвери (джерела струму) на MOSFET



MOSFET має надзвичайно високий вхідний опір затвора (до ГОм), при цьому струм, що протікає через канал між витоком і стоком, керується напругою затвора.

МОН-транзистори ідеально підходять для використання в якості електронних перемикачів або як підсилювачів із загальним витоком, оскільки їх споживана потужність дуже мала. Типові застосування для MOSFET - в мікропроцесорах, пам'яті, калькуляторах, логічних CMOS-перемикачах тощо.



Далі буде...

**Інші напівпровідникові елементи  
(тиристори, IGFET, etc...)**