



Poluprovodnički elementi u električnim kolima – tranzistori

Marko Dimitrijević, Dragan Mančić

Tranzistori

- Tranzistori su poluprovodnički elementi koji imaju tri priključka. Prema nosiocima naelektrisanja čije kretanje čini struje tranzistora, dele se na dva tipa: **bipolarne** i **unipolarne** tranzistore.
- **Bipolarni tranzistor** je tip tranzistora koji koristi i elektrone i šupljine kao nosioce naelektrisanja. Nasuprot tome, **unipolarni tranzistor** koristi samo jednu vrstu nosioca naelektrisanja.
- Tranzistor omogućuje struji koja protiče kroz jedan od priključaka ili naponu između dva priključka (**ulazni ili kontrolišući signal**) da kontroliše struju koja teče kroz drugi priključak (**izlazni ili kontrolisani signal**). Ova pojava se naziva **tranzistorski efekat**.

Tranzistori

- Zavisno od tipa tranzistora, tranzistorski efekat se postiže različitim fizičkim mehanizmima: **injekcijom nosilaca i modulacijom širine PN spoja** kod bipolarnih tranzistora ili **efektom polja** kod unipolarnih tranzistora.
- Pošto tranzistor ima tri priključka, jedan priključak se koristi kao **zajednički** čvor. U zavisnosti od izbora zajedničkog priključka, moguće je realizovati tri topologije kola sa tranzistorima.
- Tranzistori se nazivaju **aktivnim elementima**, jer snaga izlaznog signala može biti veća od snage ulaznog signala. Povećanje snage se ostvaruje na račun jednosmernog napona napajanja tranzistora.

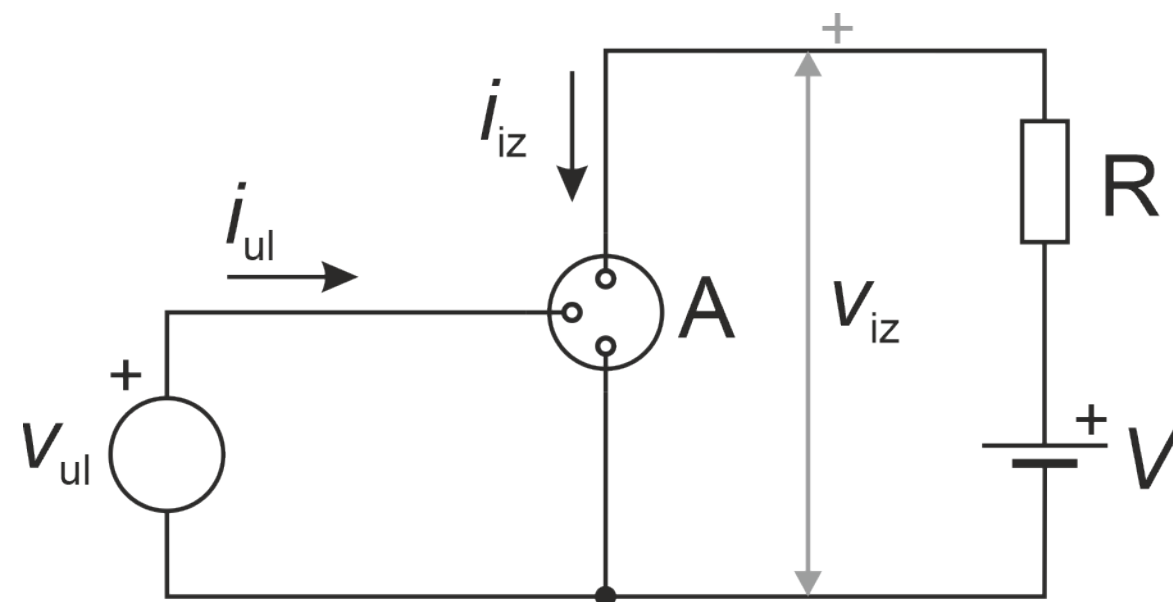
Tranzistori

A – aktivni element (tranzistor)

v_{ul} , i_{ul} – ulazni signali

v_{iz} , i_{iz} – izlazni signali

V – jednosmerni napon napajanja



Karakteristike tranzistora

- Kola sa tranzistorima imaju topologiju **čtetvoropola**.
- Napon između ulaznog i zajedničkog priključka je **ulazni napon** v_{ul} , a napon između izlaznog i zajedničkog priključka **izlazni napon** v_{iz} .
- Struja koja utiče u ulazni priključak je **ulazna struja** i_{ul} , struja koja utiče u izlazni priključak je **izlazna struja** i_{iz} .
- Ponašanje tranzistora (kao i bilo kog četvoropola) se može opisati ovim veličinama: v_{ul} , i_{ul} , v_{iz} , i_{iz} . (Sistem, čije ponašanje je poznato, ali ne i njegova struktura, u elektronici se naziva **crna kutija – black box.**)

Karakteristike tranzistora

- Zavisnost ulazne struje i_{ul} od ulaznog napona v_{ul} se naziva **ulazna karakteristika.**
- Zavisnost izlazne struje i_{iz} od izlaznog napona v_{iz} se naziva **izlazna karakteristika.**
- Zavisnosti izlazne struje i_{iz} ili napona v_{iz} od ulazne struje i_{ul} ili napona v_{ul} se nazivaju **prenosne karakteristike.**

Režimi rada tranzistora

- U zavisnosti od vrednosti i polariteta napona između priključaka, tranzistori mogu biti u različitim **režimima**.
- Tranzistor, zavisno od režima u kome se nalazi, može da funkcioniše kao (naponom ili strujom) kontrolisani strujni izvor ili kontrolisani prekidač.
- Režimi u kojima tranzistori funkcionišu kao kontrolisani strujni izvori se koriste u **analognim elektronskim kolima**, za **pojačanje analognih signala**.
- Režimi u kojima se tranzistori ponašaju kao kontrolisani prekidači se koriste u **logičkim (digitalnim) kolima**.

Bipolarni tranzistor

- Bipolarni tranzistor (*Bipolar Junction Transistor*, BJT) je tip tranzistora kod koga električnu struju čine oba nosioca naelektrisanja – elektroni i šupljine.
- Bipolarni tranzistor su 1947. konstruisali **John Bardeen**, **Walter Brattain** i **William Shockley** iz Bell laboratorije.
- Otkriće poluprovodničkog, bipolarnog tranzistora je omogućilo složenije elektronske uređaje i trasiralo put ka razvoju integrisanih kola.
- Za realizaciju prvog tranzistora, korišćen je germanijum.

Bipolarni tranzistor - istorija

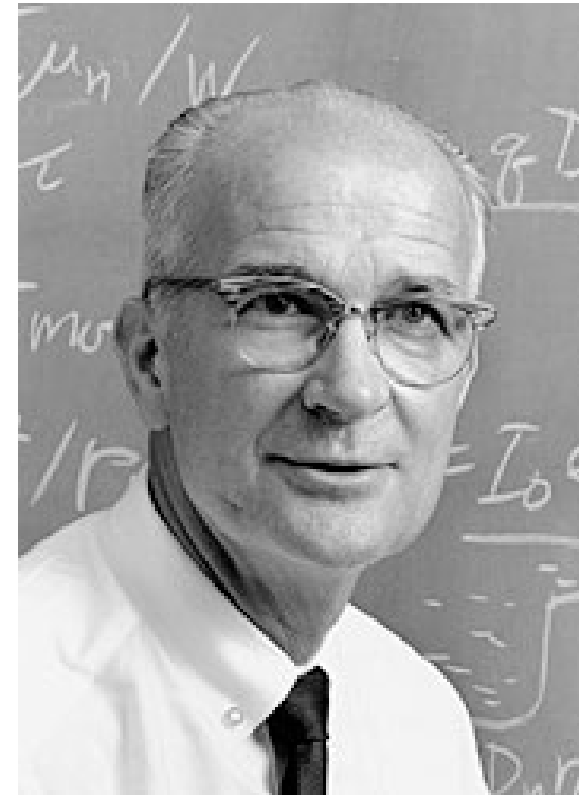
- Nobelova nagrada za fiziku 1956. godine (fotografije: wikipedia.org)



John Bardeen

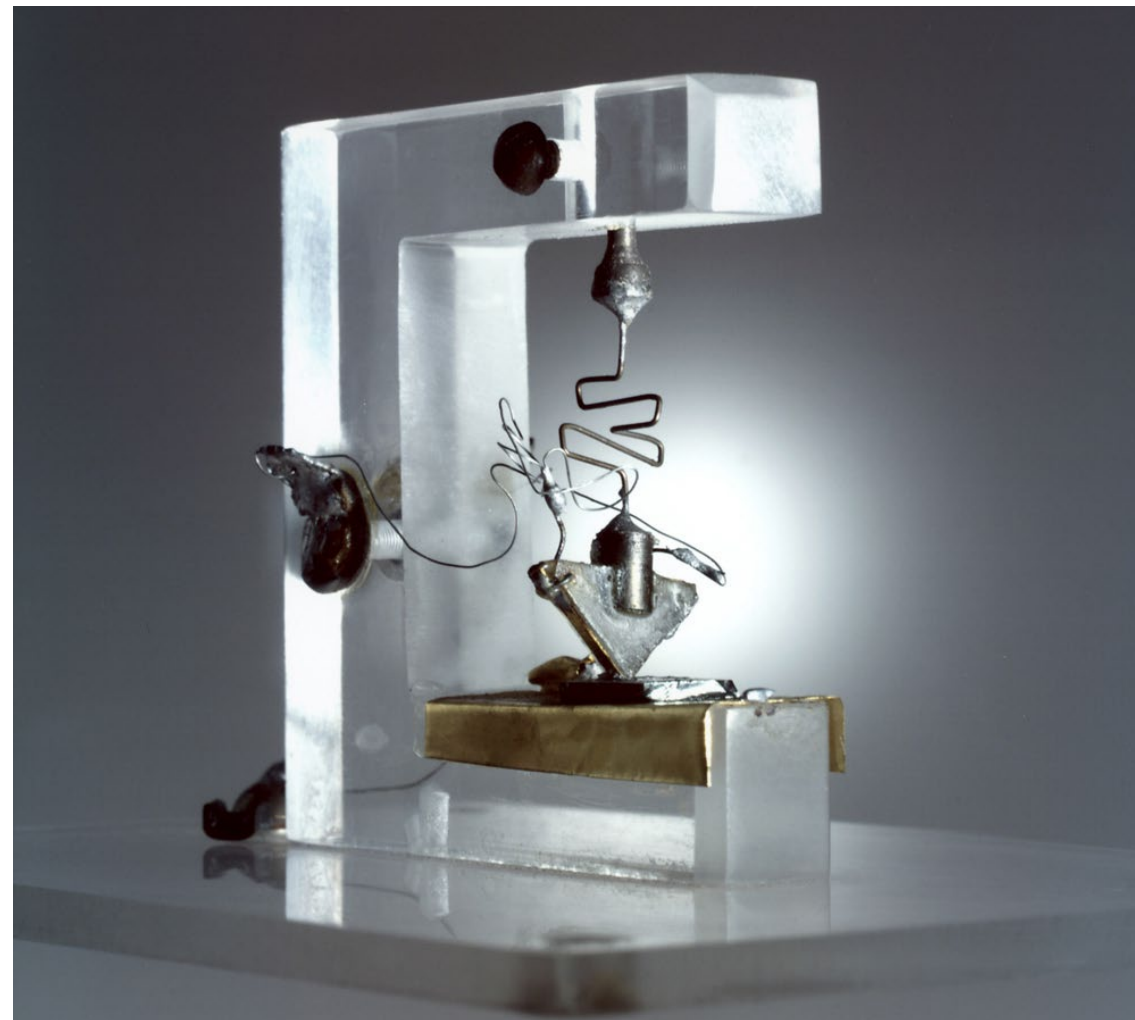
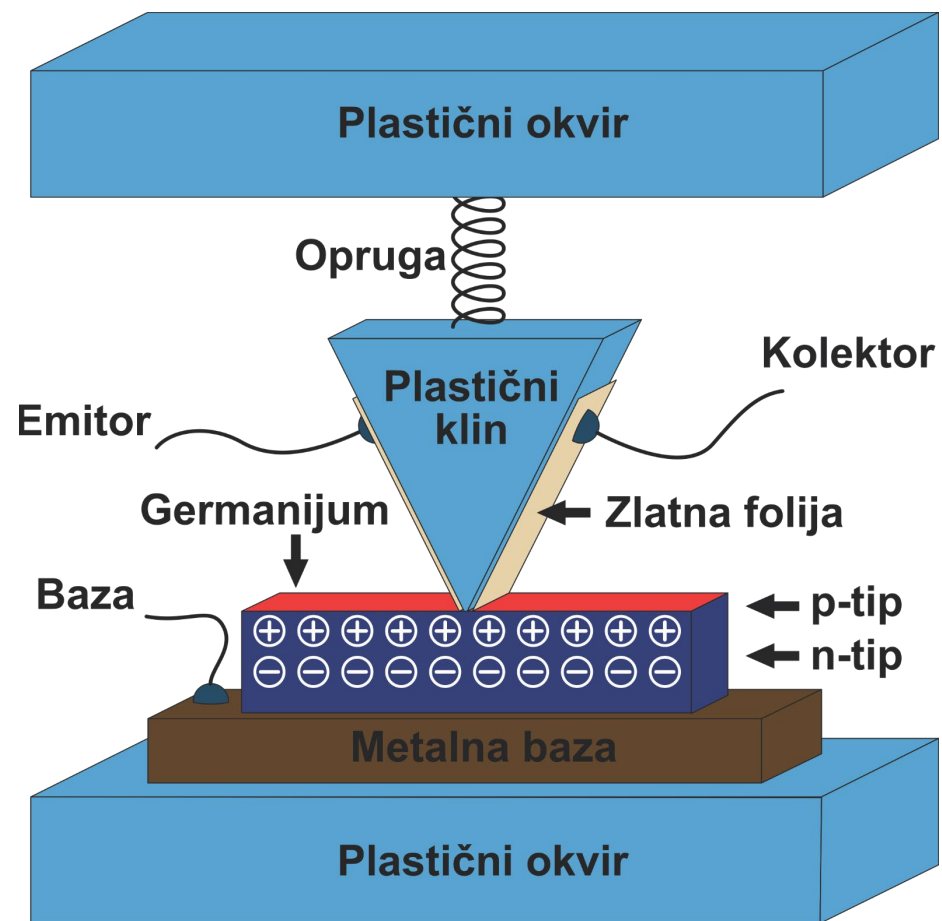


Walter Brattain



William Shockley

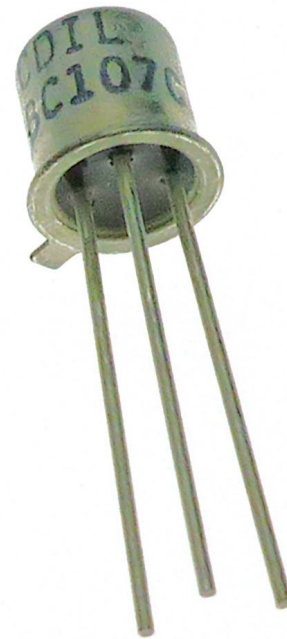
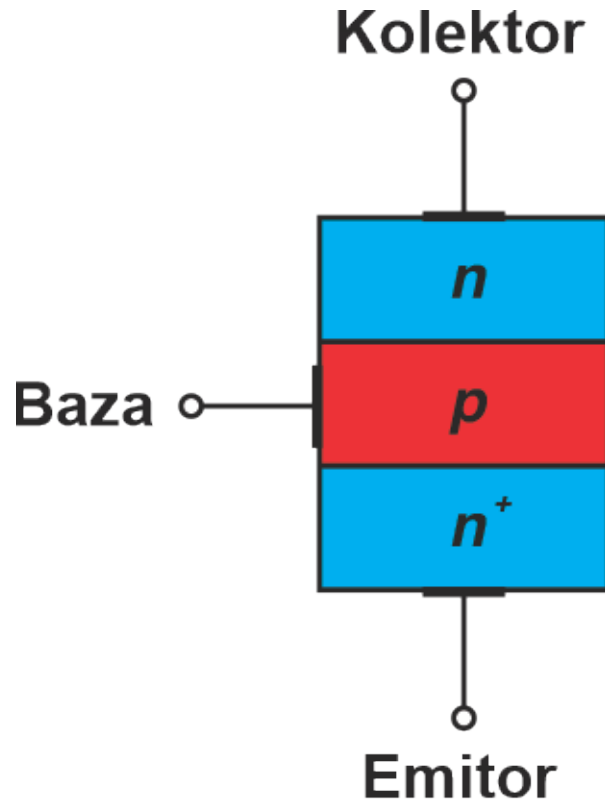
Bipolarni tranzistor - istorija



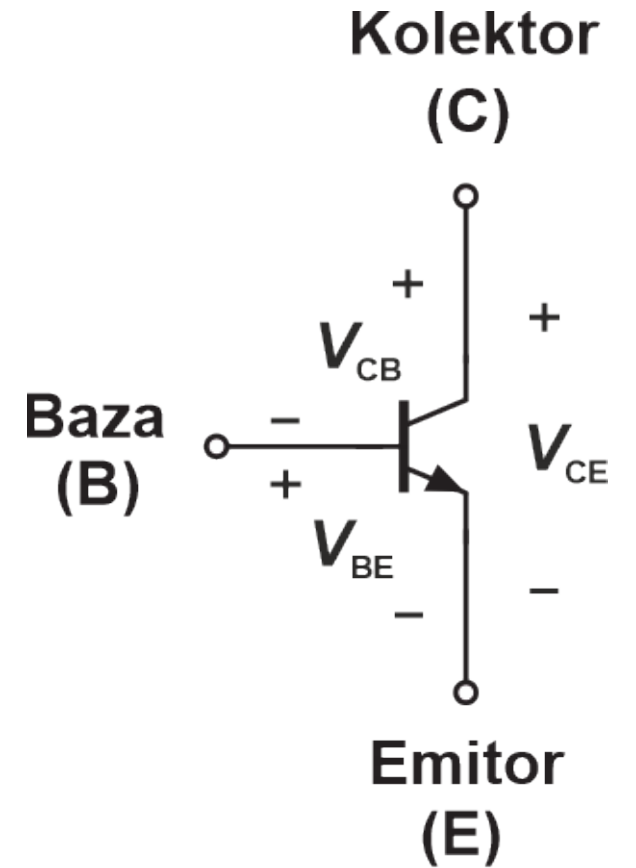
Bipolarni tranzistor

- Bipolarni tranzistor je poluprovodnički element koji ima tri različito dopirane oblasti - **emitor (E)**, **kolektor (C)** i **bazu (B)**. Emitor i kolektor su poluprovodničke oblasti istog tipa, ali nisu identične (emitor je dopiran većom koncentracijom dopanata). Ove oblasti su ujedno i priključci bipolarnog tranzistora.
- Postoje dva PN spoja, **emitorski** (spoj između baze i emitora) i **kolektorski** (spoj između baze i kolektora).
- Postoje dve realizacije bipolarnog tranzistora – **NPN** i **PNP**.

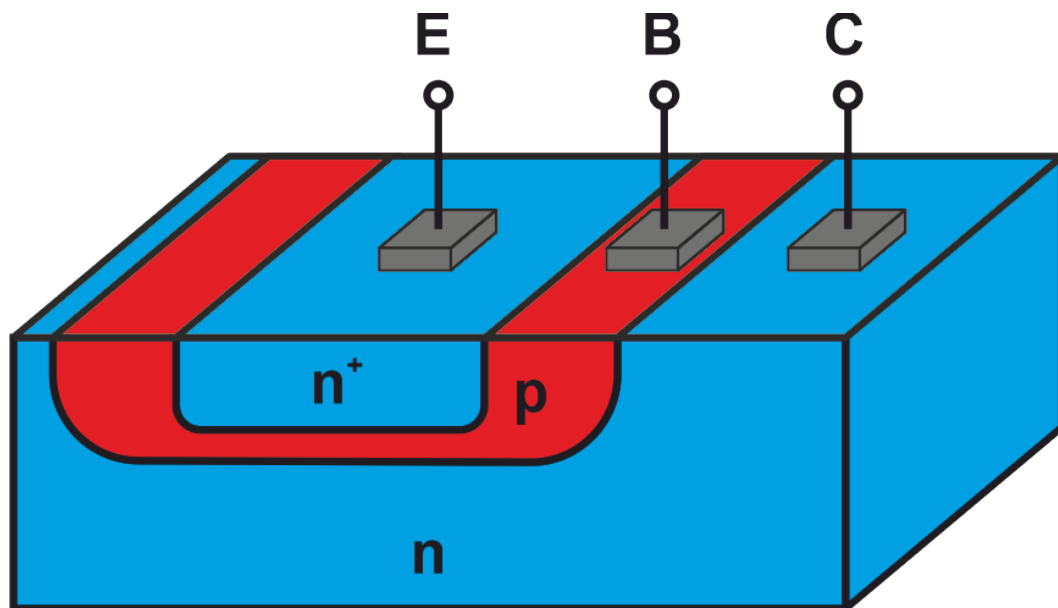
Struktura bipolarnog tranzistora (NPN)



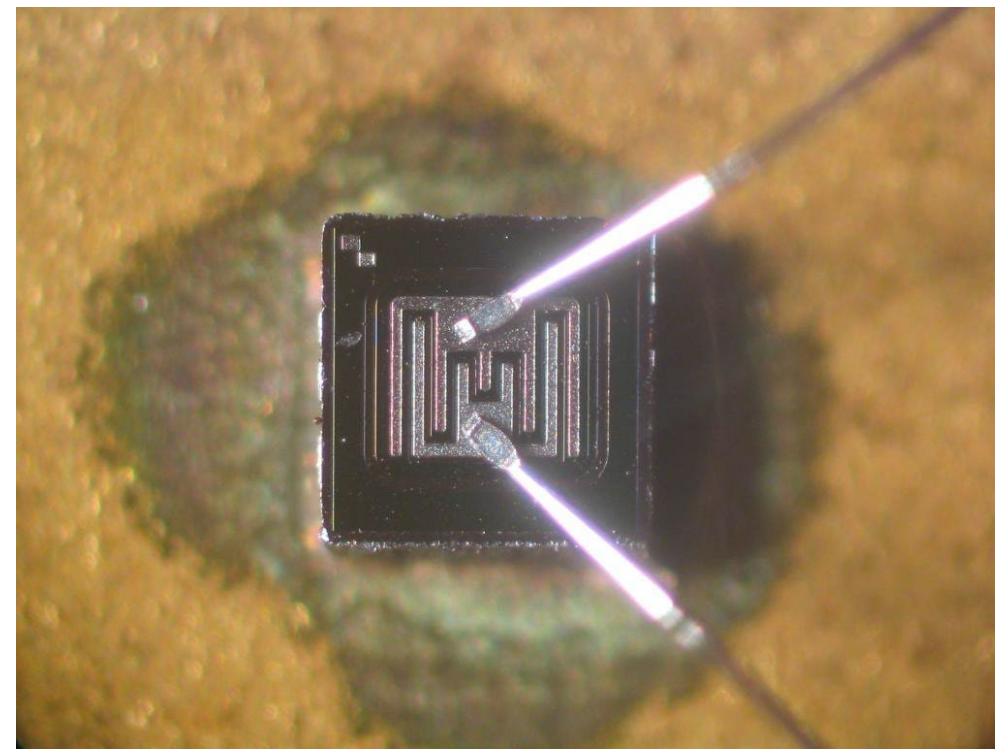
BC107



Struktura bipolarnog tranzistora



Poprečni presek NPN tranzistora (PNP tranzistor ima analognu strukturu, oblasti kolektora i emitora su p tipa, oblast baze n tipa)



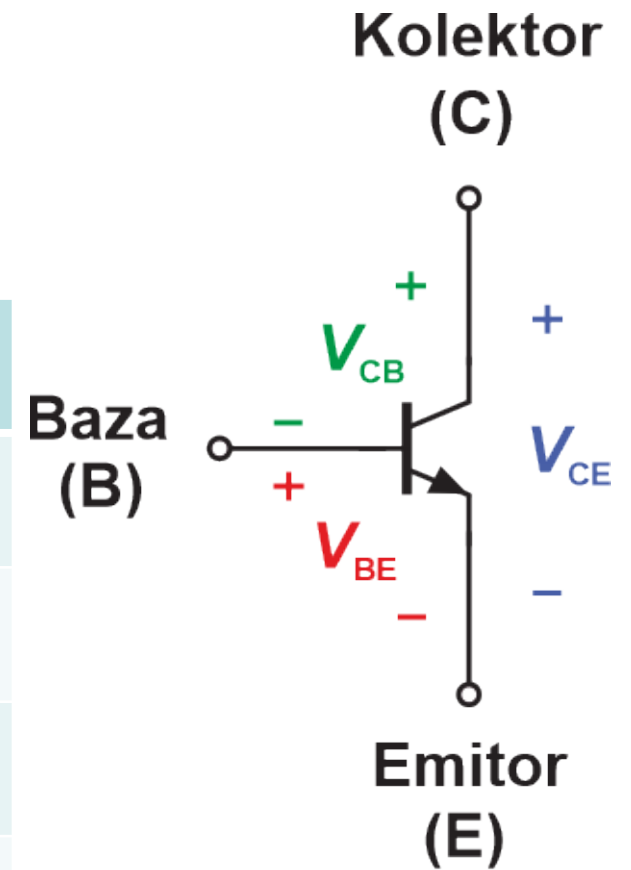
NPN tranzistor KSI34. Žice (*bonds*) su povezane sa bazom i emitorom. Kolektor je kratkospojen sa metalnim kućištem inkapsulacije.

(fotografija: wikipedia.org)

Režimi rada

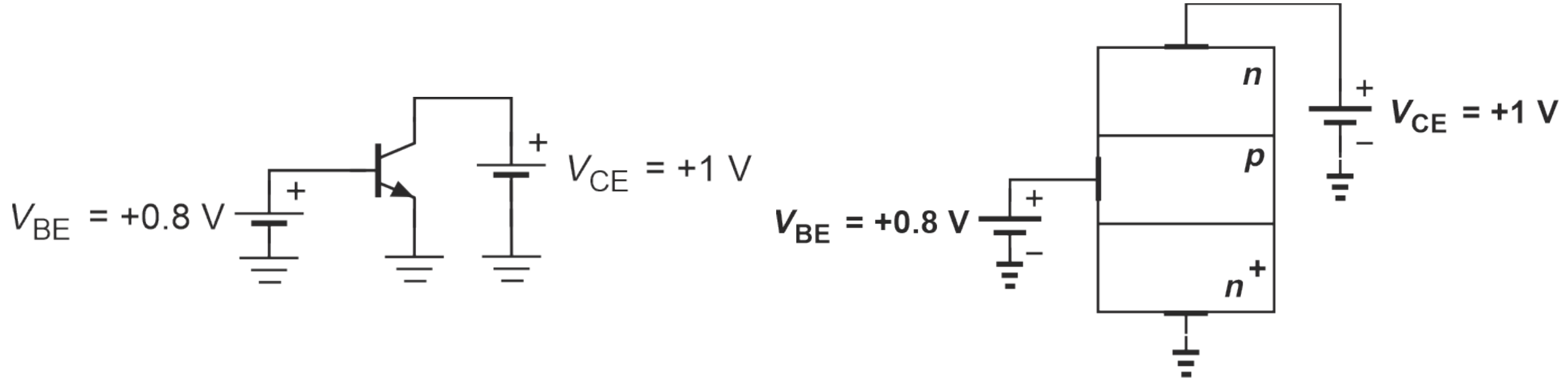
- Režim rada bipolarnog tranzistora zavisi od polarizacija spojeva, odnosno napona između priključaka (NPN tip tranzistora).

Naponi	Emitorski spoj	Kolektorski spoj	Režim rada	Ponašanje
$V_{BE} > 0,$ $V_{CB} > 0$	direktno	inverzno	aktivna oblast	Kontrolisani strujni izvor
$V_{BE} > 0,$ $V_{CB} < 0$	direktno	direktno	zasićenje	Zatvoreni prekidač
$V_{BE} < 0,$ $V_{CB} > 0$	inverzno	inverzno	zakočenje	Otvoreni prekidač
$V_{BE} < 0,$ $V_{CB} < 0$	inverzno	direktno	inverzna aktivna oblast	



Aktivni režim

- U aktivnom režimu, emitorski spoj je direktno polarisan, kolektorski inverzno



$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} \geq 0$$

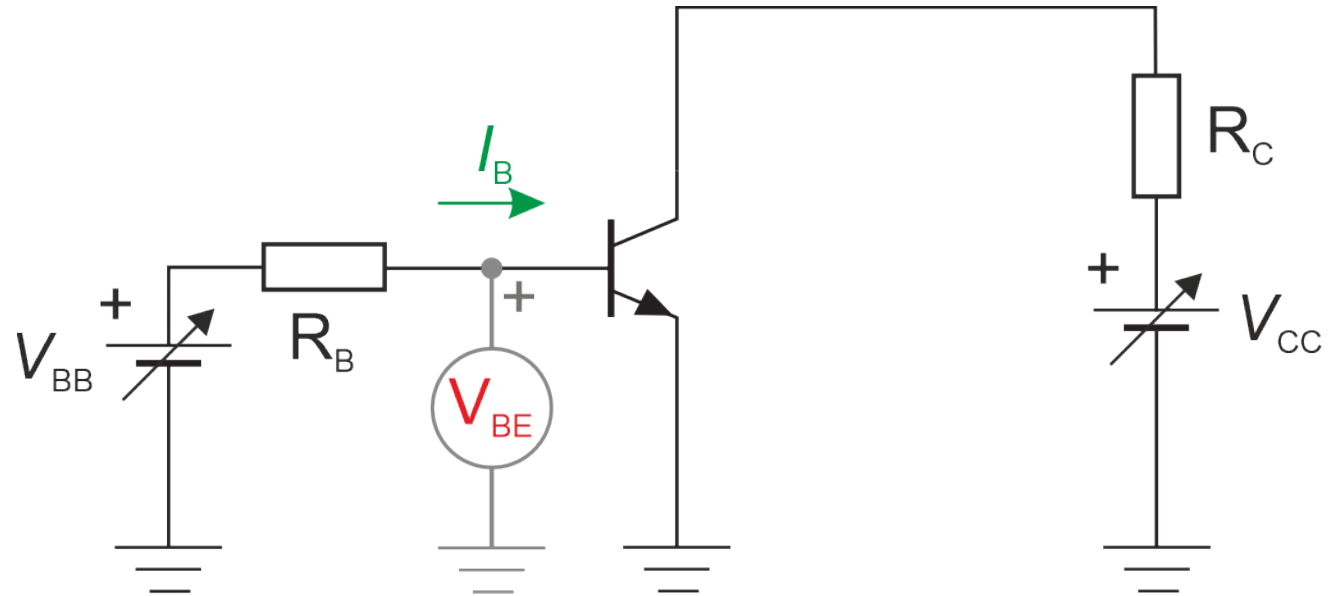
Struja baze

- Struja baze I_B je struja direktno polarisanog PN spoja (aktivni režim)

$$I_B = I_{BS} \left(\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right)$$

$$I_B \approx I_{BS} \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$

I_{BS} – struja zasićenja emitorskog spoja, konstanta



Kolektorska struja

$$I_C = I_S \left(\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) \approx I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$

$$I_S = \frac{A_E \cdot q_e \cdot n_i^2 \cdot D_n}{W_B \cdot N_B}$$

A_E – površina emitorskog spoja

W_B – širina oblasti baze

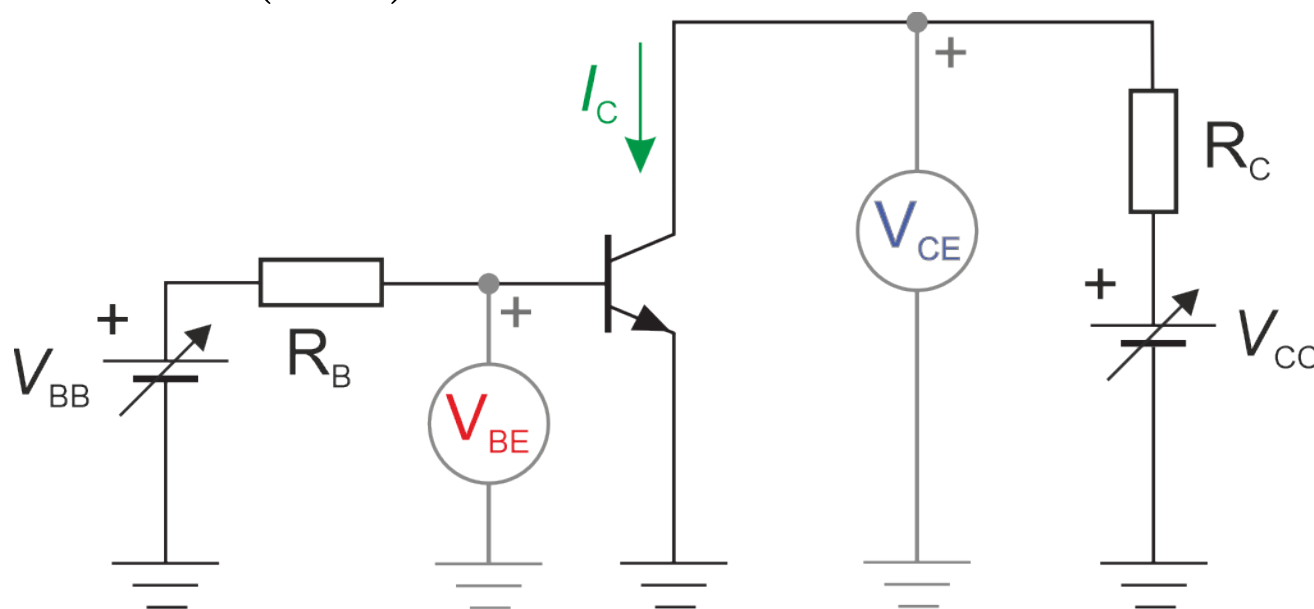
N_B – koncentracija dopanata u bazi

n_i – sopstvena koncentracija nosilaca

D_n – difuzibilnost elektrona

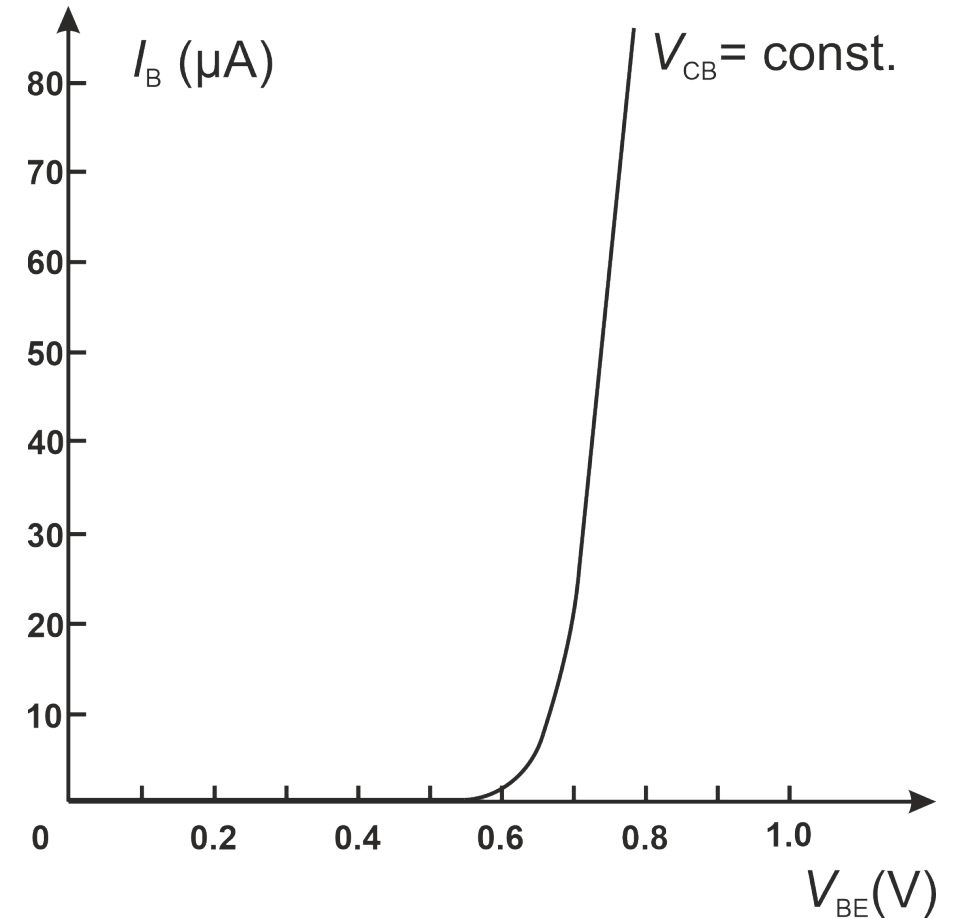
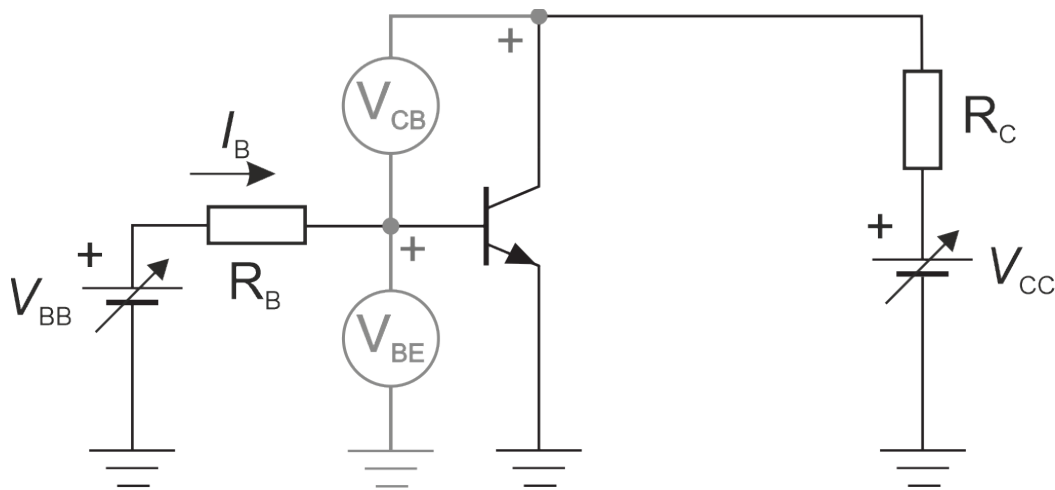
V_T – termalni napon (26mV na 300K)

V_A – Erlijev (Early) napon



Zavisnost struje baze I_B od napona V_{BE}

- **Ulazna karakteristika**
- V_{CB} konstantno
- Familija karakteristika za različite vrednosti V_{CB}



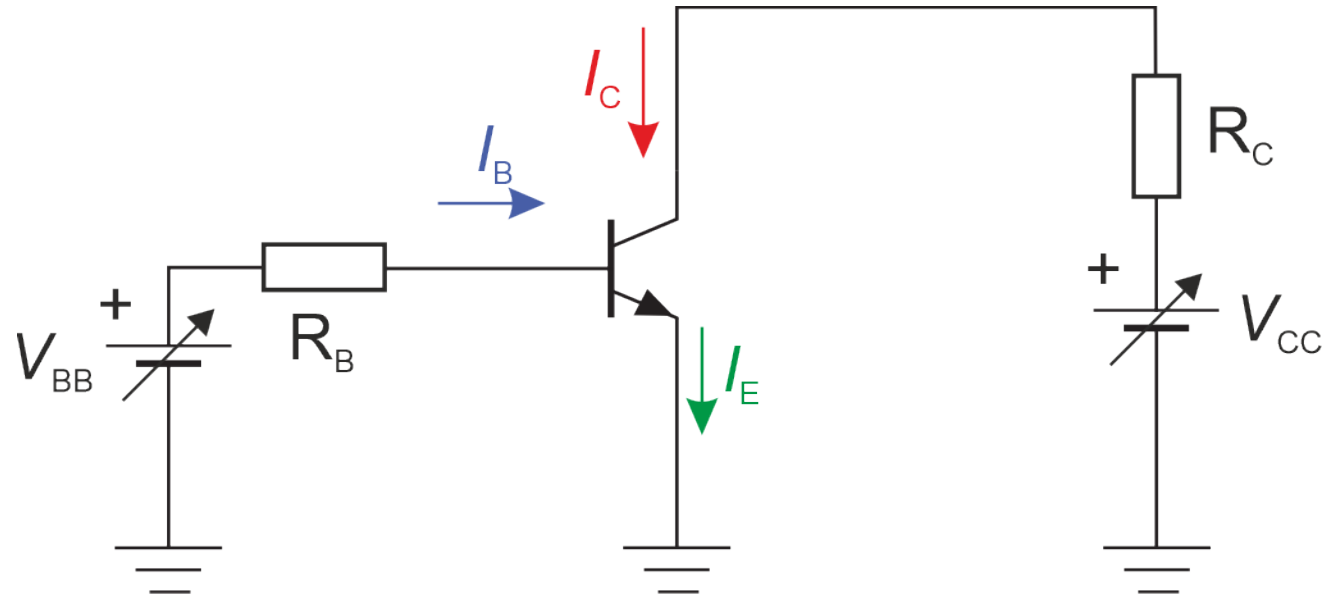
Zavisnost struje kolektora I_C od struje baze I_B

- Prenosna karakteristika
- Zavisnost je linearna:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

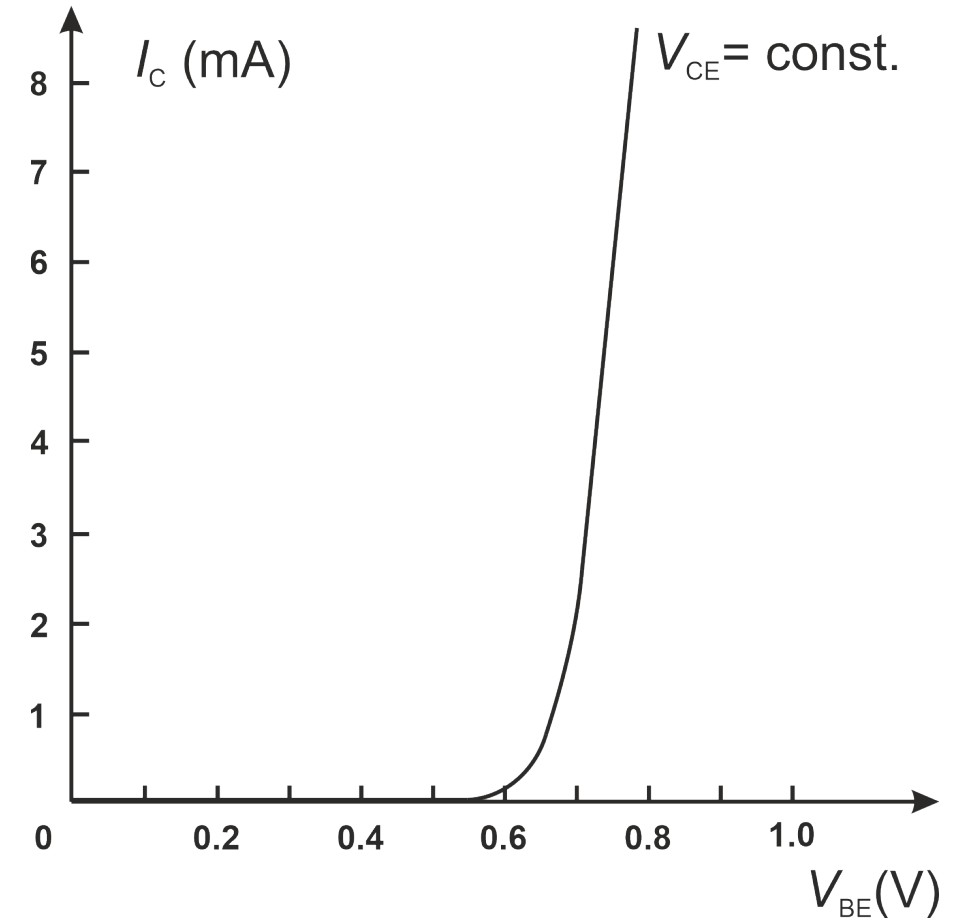
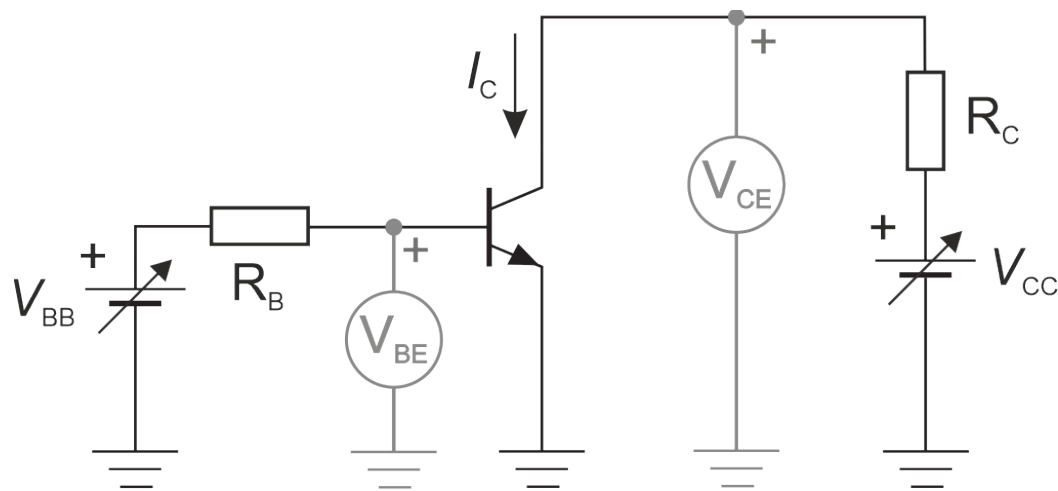
- β je koeficijent strujnog pojačanja ($\beta \approx 100$).

$$I_E = I_C + I_B = (\beta + 1) \cdot I_B$$



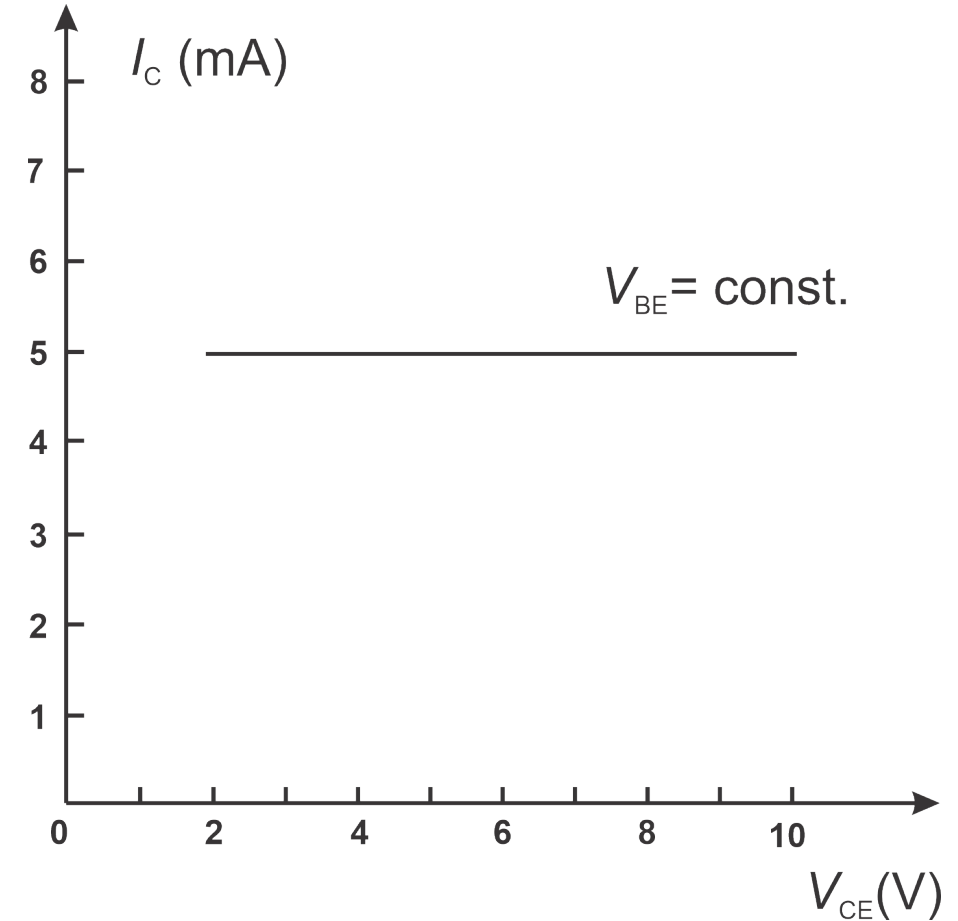
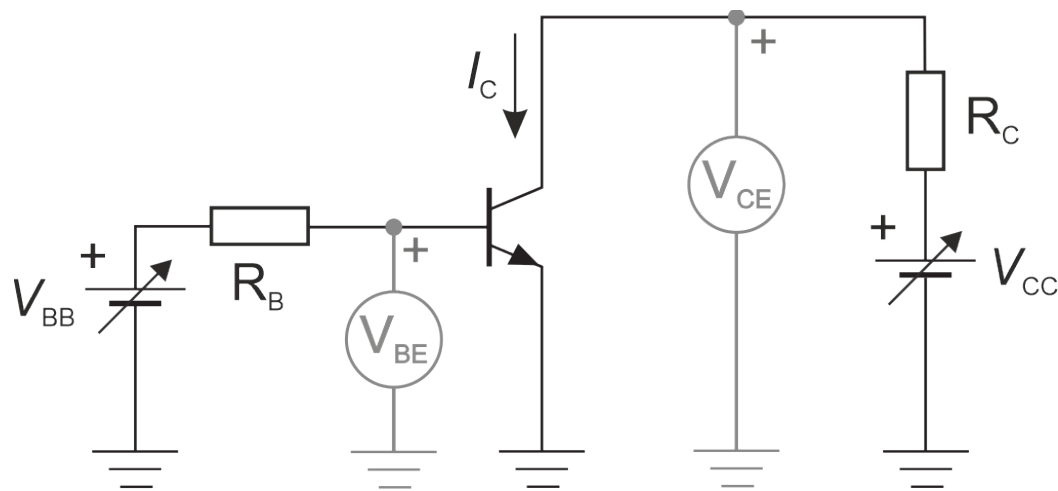
Zavisnost struje kolektora I_C od napona V_{BE}

- Prenosna karakteristika
- V_{CE} konstantno
- Familija karakteristika za različite vrednosti V_{CE}



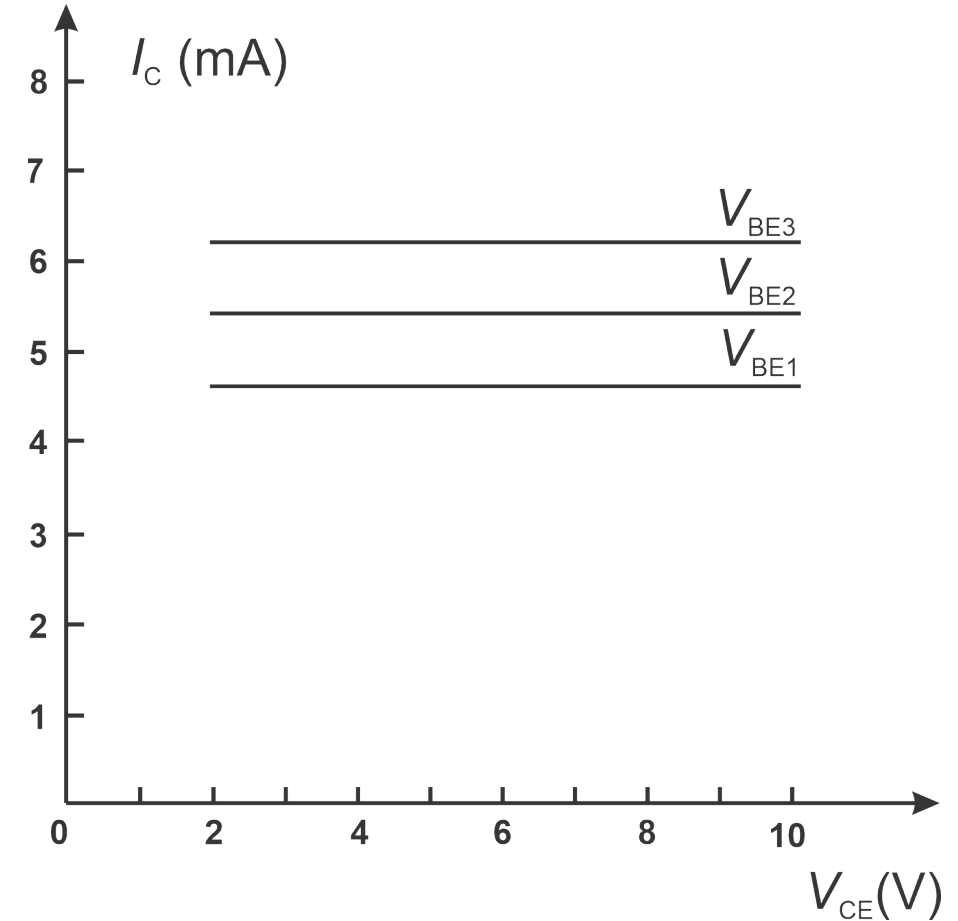
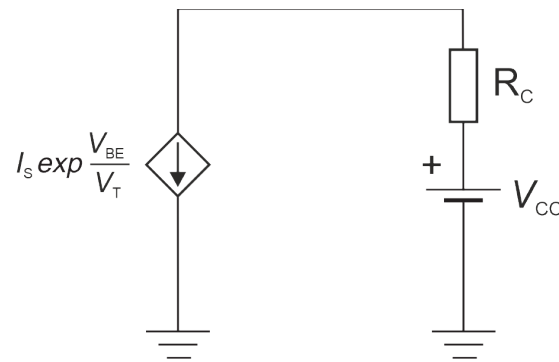
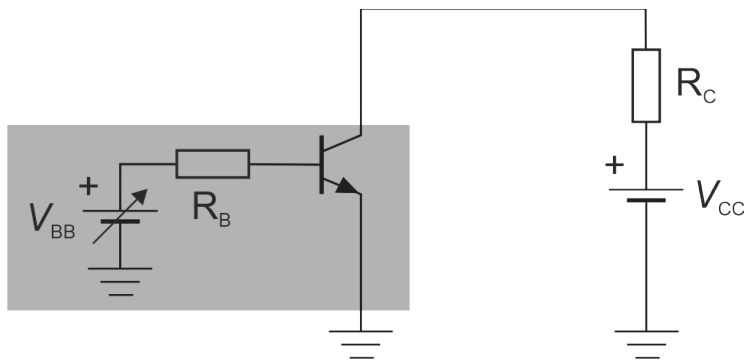
Zavisnost struje kolektora I_C od napona V_{CE}

- Izlazna karakteristika
- V_{BE} konstantno
- Familija karakteristika za različite vrednosti V_{BE}

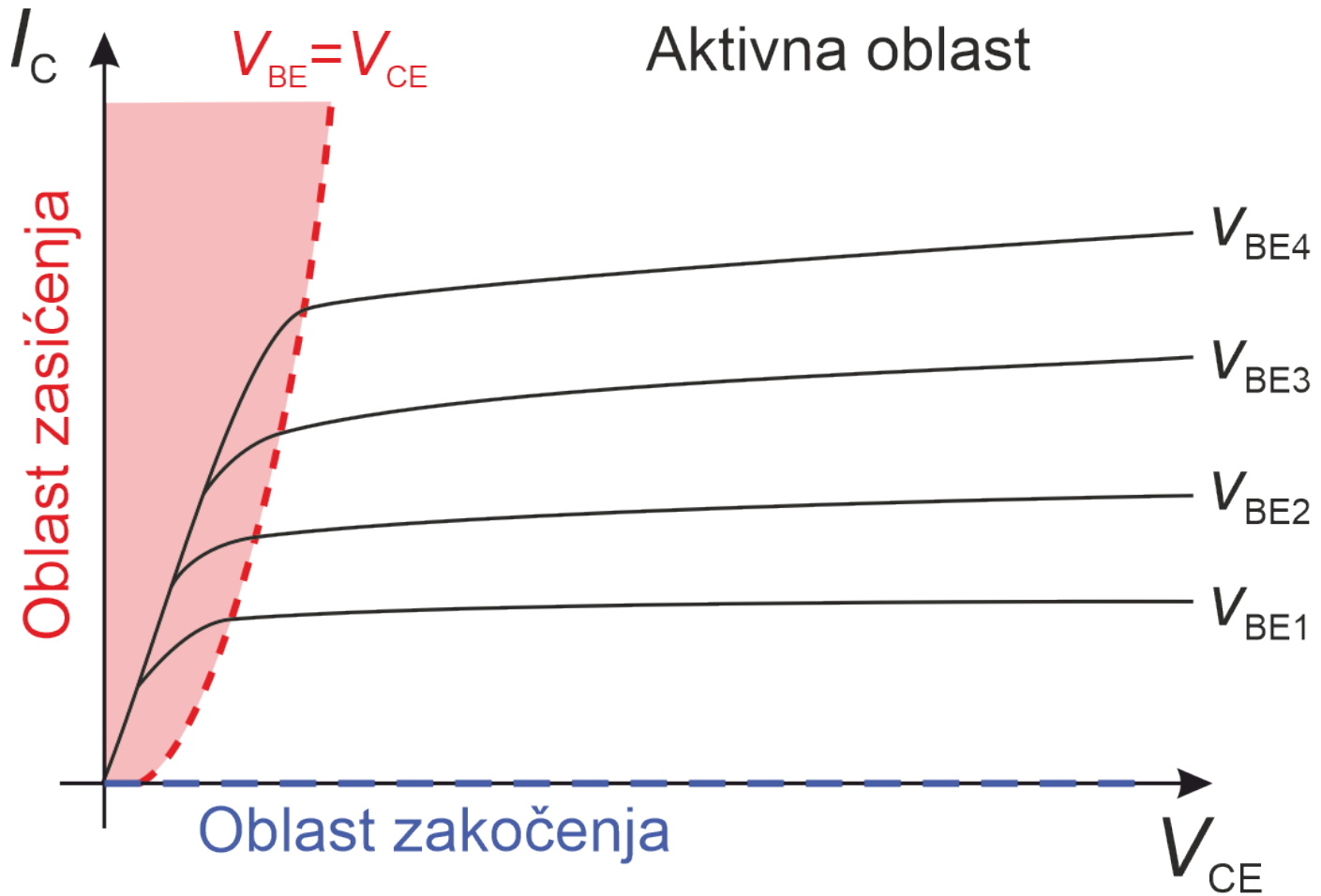


Zavisnost struje kolektora I_C od napona V_{CE}

- Strujni izvor kontrolisan naponom V_{BE}
- Struja I_C vrlo malo zavisi od napona V_{CE}



Izlazna karakteristika bipolarnog tranzistora sa označenim režimima rada



Tranzistori sa efektom polja

- Tranzistori sa **efektom polja** (***Field Effect Transistor, FET***) su unipolarni tranzistori; struju koja protiče kroz tranzistor čini samo jedan tip nosilaca.
- Postoje različite realizacije tranzistora sa efektom polja: **MOSFET** (***Metal Oxide Semiconductor FET***), **JFET** (***Junction FET***), **MODFET** (***Modulation Dopped FET***, u literaturi poznat i kao *HEMT – High Electron Mobility Transistor*), **MESFET** (***Metal Semiconductor FET***), **FinFET** (fin /en/ – rebro), itd.

Tranzistori sa efektom polja

- 1959. godine napravljen je prvi MOSFET u Bell-ovoj laboratoriji.



Mohamed Atalla

(fotografije: wikipedia.org)

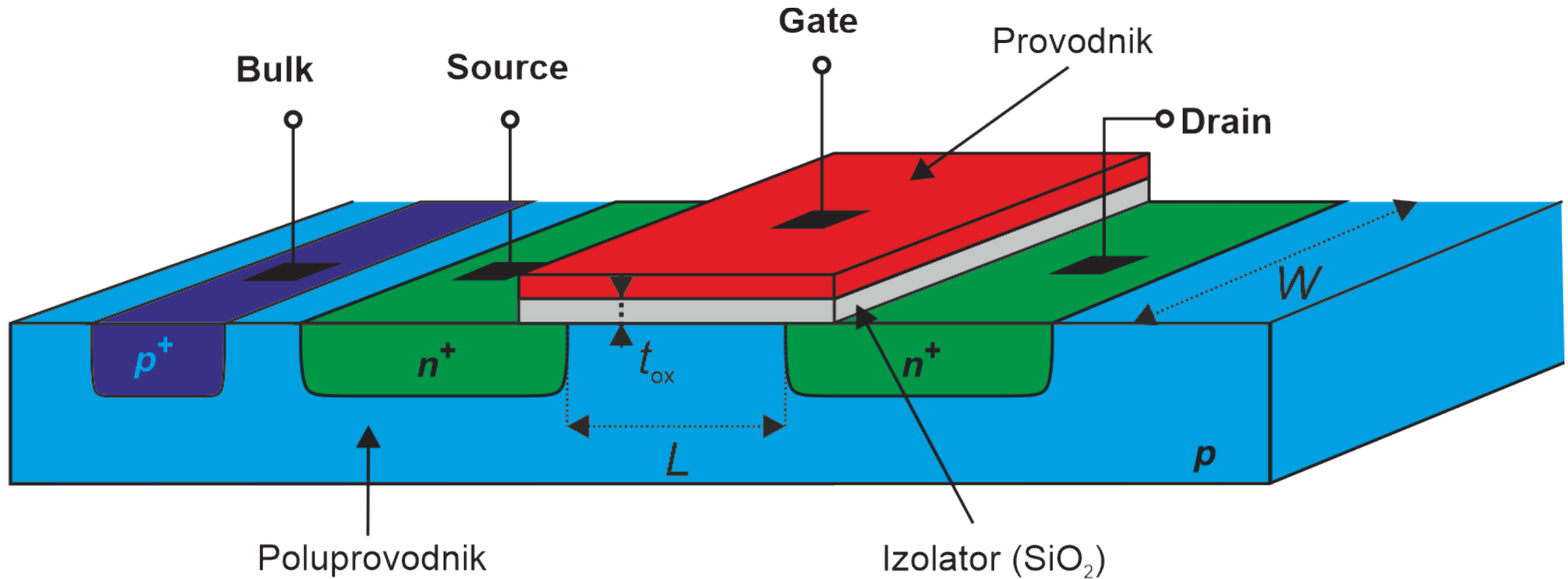


Dawon Kahng

Tranzistori sa efektom polja

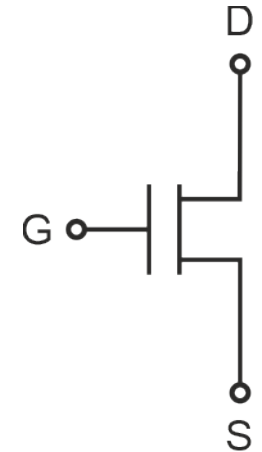
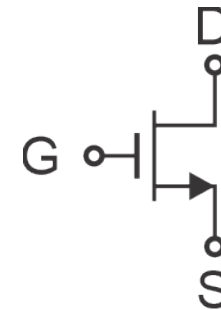
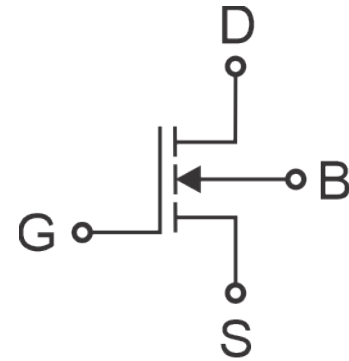
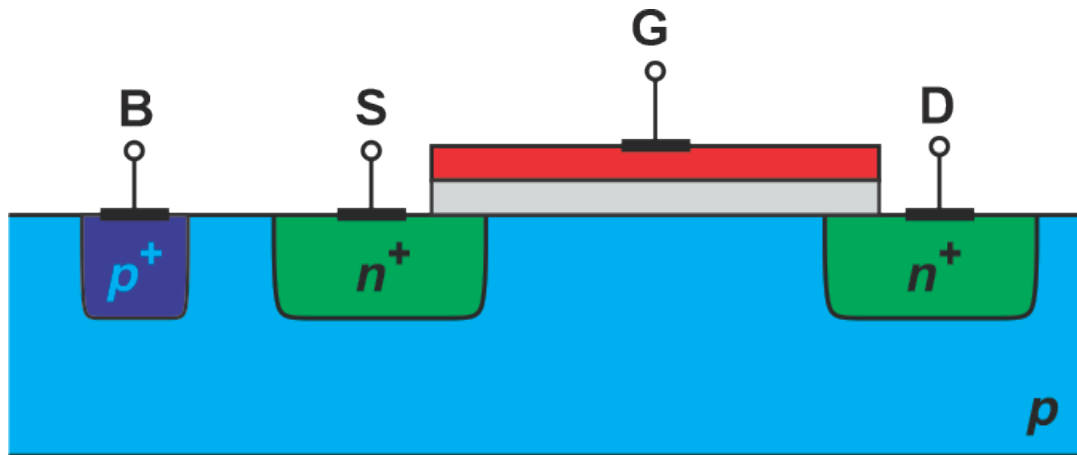
- Najčešći tip tranzistora sa efektom polja je **M**etal **O**xide **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor (MOSFET). Ime ukazuje na strukturu tranzistora: sastoji se od provodnog (**M**etal) kontakta koji se zove **gejt (G)**, dielektričnog sloja od silicijum oksida (SiO_2 , **O**xide) i poluprovodničke strukture (**S**emiconductor).
- Poluprovodnička struktura, ima dva kontakta – **sors (S)** i **drejn (D)**. Kanal je simetričan u odnosu na ova dva priključka.
- Osnova ili supstrat (**bulk, B**) MOS tranzistora je vezana za najniži potencijal u kolu.

Struktura MOS tranzistora (n-kanalni)



W – širina kanala, L – dužina kanala, t_{ox} – debljina oksida

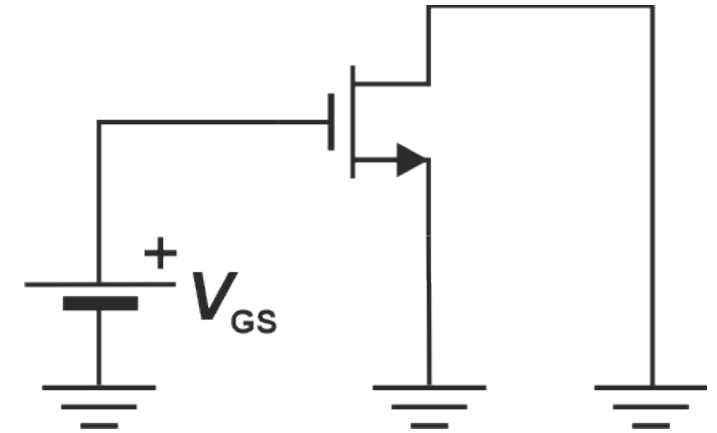
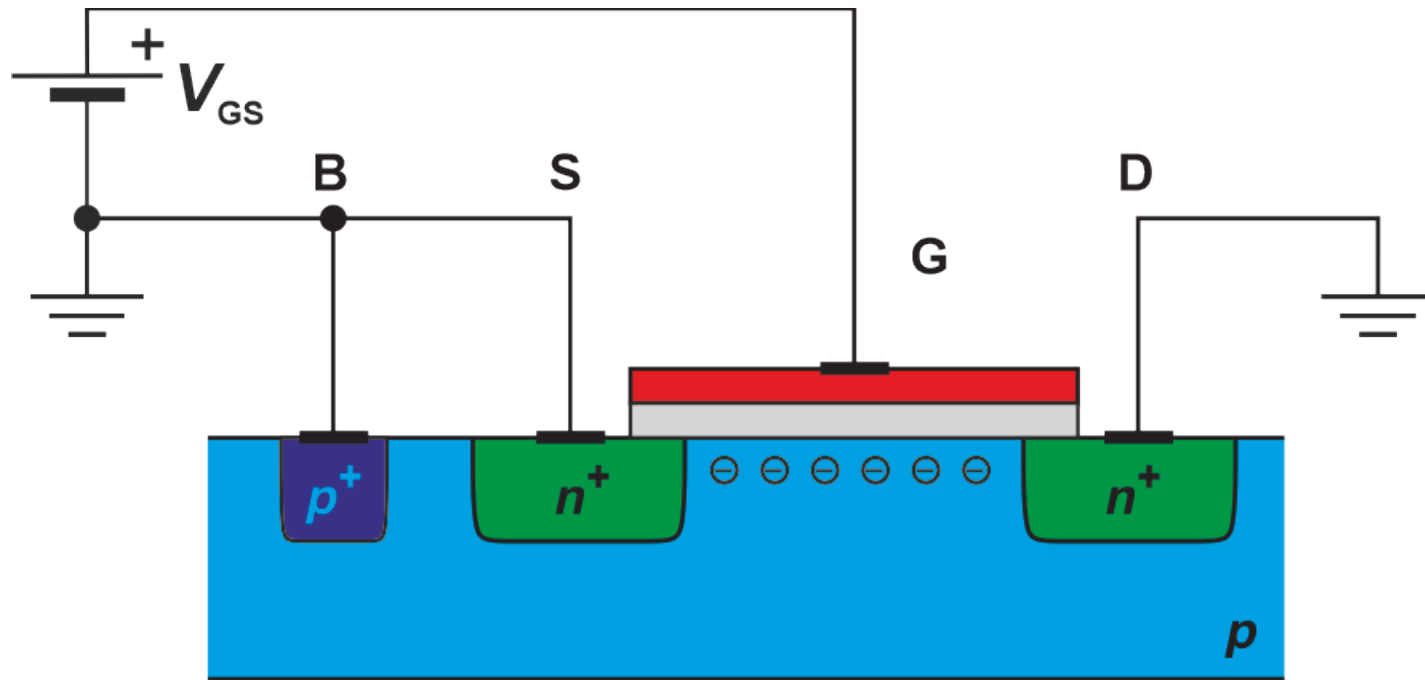
2D struktura MOS tranzistora i simboli (n-kanalni)



Tranzistorski efekat

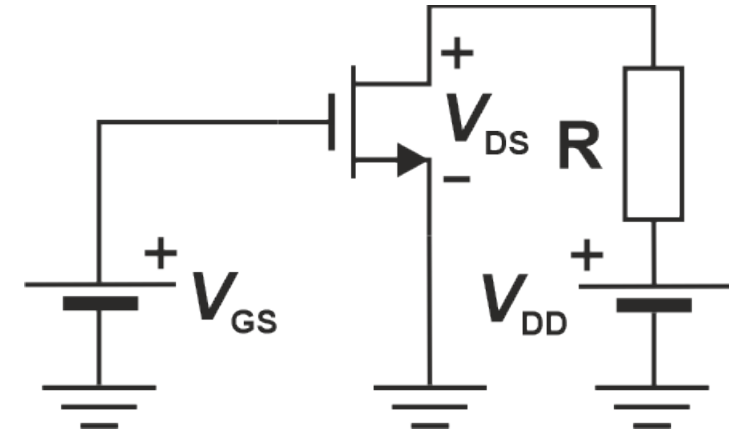
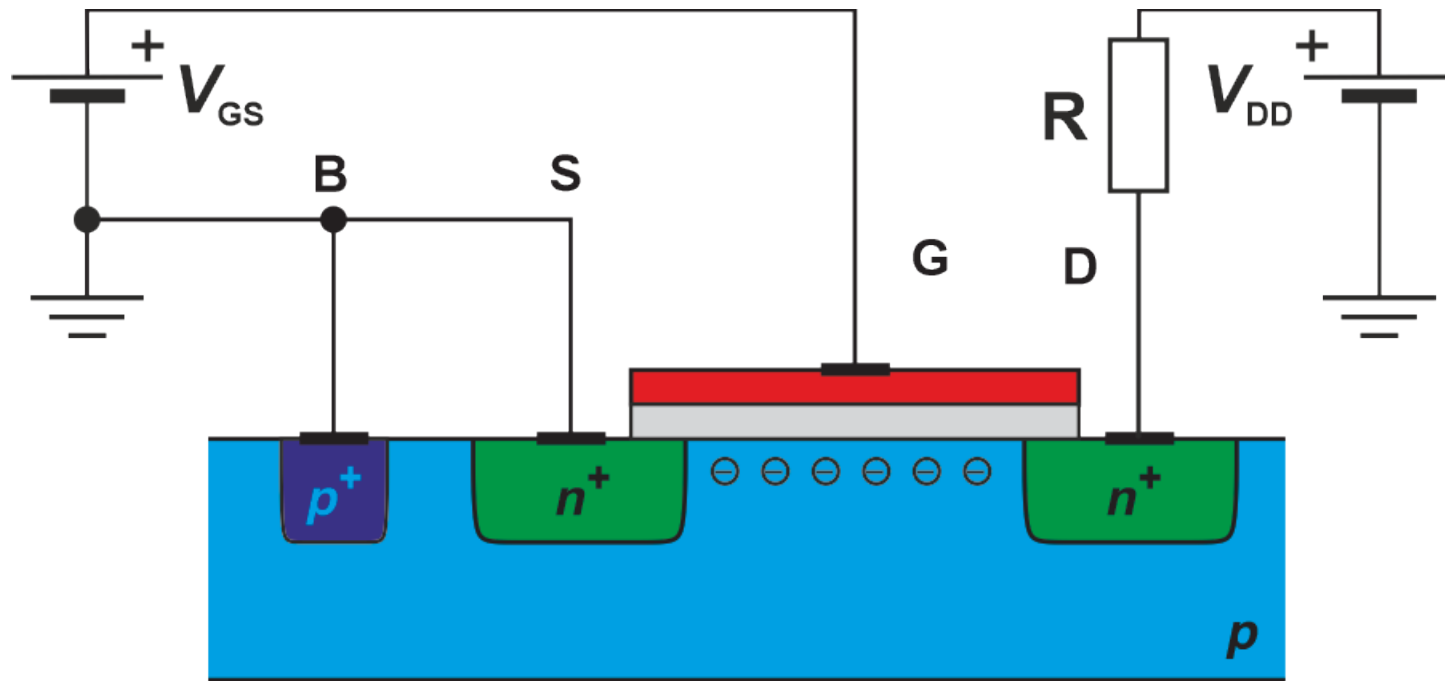
- Pošto je gejt galvanski izolovan od poluprovodnika slojem oksida, **kroz gejt ne protiče struja.**
- Struktura metal-oksid-poluprovodnik je u električnom smislu **kondenzator**. Ukoliko između gejta i poluprovodničke osnove postoji napon, uspostaviće se električno polje koje prouzrokuje nagomilavanje slobodnih nosilaca u poluprovodniku neposredno ispod oksida. Veća koncentracija nosilaca dovodi do veće provodnosti poluprovodnika.
- Ukoliko napon na gejtu pređe određeni prag napona V_{TH} , u poluprovodniku ispod oksida se formira **kanal** koji provodi struju.
- **Napon gejta kontroliše struju koja protiče između sorsa i drejna.**

Tranzistorski efekt



- Sors je vezan za najnižji potencijal, $V_S=0$ ($V_D=0$, $V_G=V_{GS}$).
- Kada je $V_{GS} > V_{TH}$, u supstratu se formira provodni kanal koga čine slobodni elektroni.

Tranzistorski efekat

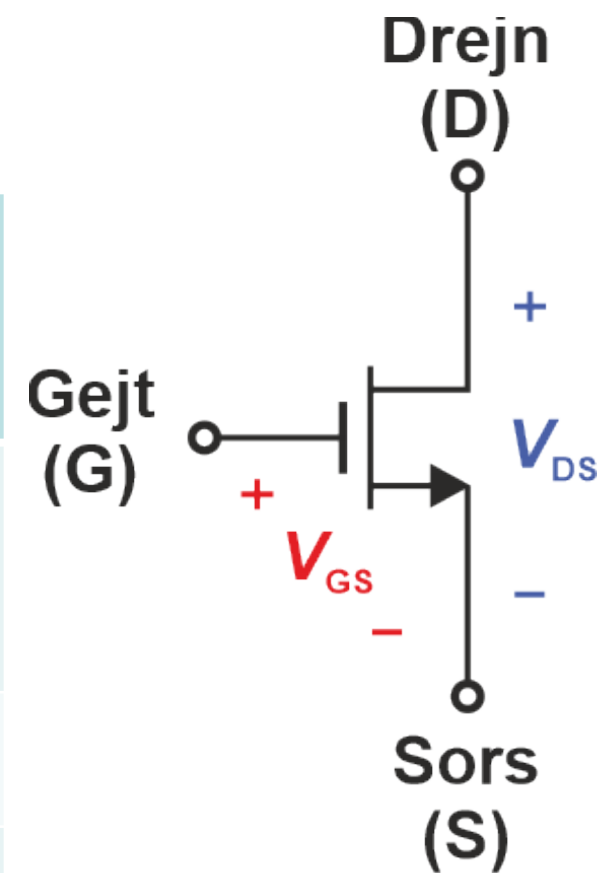


- Kada je $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$, protiče **struja drejna** I_D koja zavisi od V_{DS} i V_{GS} .

Režimi rada MOSFET-a

- Režim rada MOSFET-a zavisi od odnosa napona između priključaka V_{GS} i V_{DS} .

Naponi	Zavisnost struje kanala I_D od V_{GS}	Zavisnost struje kanala I_D od V_{DS}	Režim rada	Ponašanje
$V_{GS} > V_{TH}$, $V_{TH} - V_{GS} < V_{DS}$ $< V_{GS} - V_{TH}$	linearna	kvadratna	triodni režim	Kontrolisani otpornik, zatvoreni prekidač
$V_{GS} > V_{TH}$, $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$	kvadratna	linerna	zasićenje	Kontrolisani strujni izvor
$V_{GS} < V_{TH}$	-	-	zakočenje	Otvoreni prekidač



Triodni režim

- Struja drejna zavisi od električnih osobina poluprovodnika i dielektrika (oksida), ali i od dimenzija tranzistora, konkretno odnosa širine i dužine kanala W/L .
- Struja kanala I_D ima **linearnu** zavisnost od napona V_{GS} i **kvadratnu** zavisnost od napona V_{DS} :

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \cdot \left(2(V_{GS} - V_{TH}) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2 \right)$$

μ_n – pokretljivost elektrona

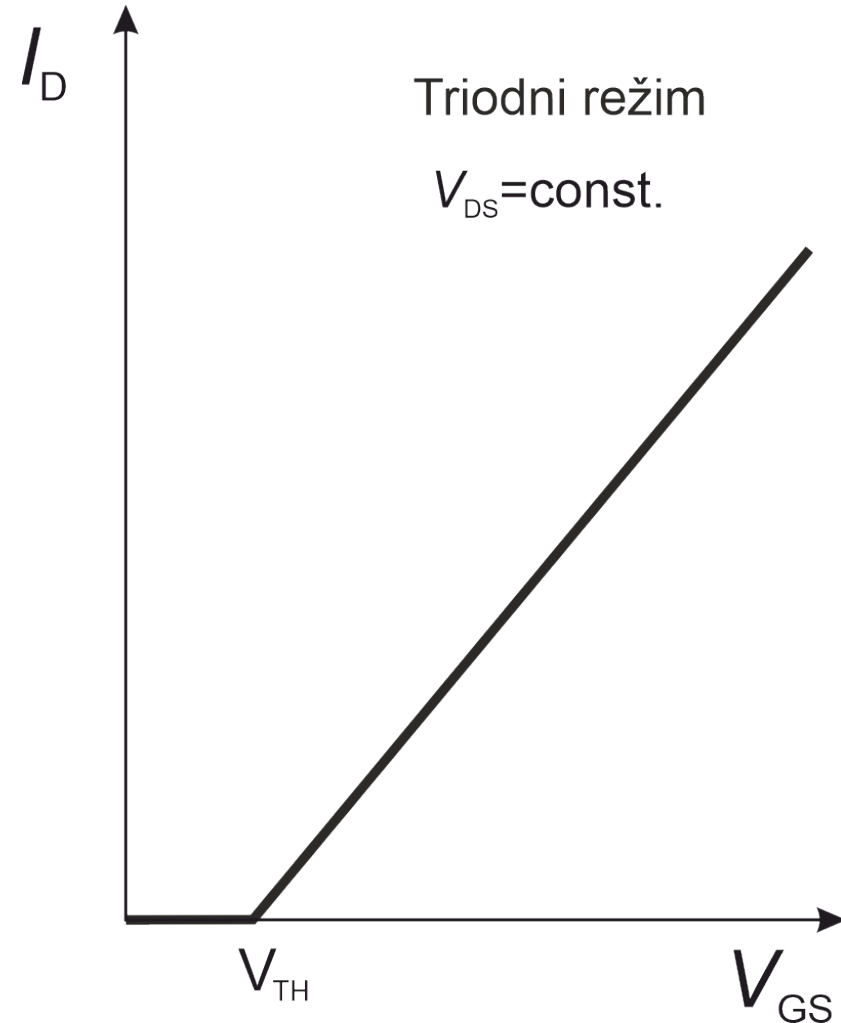
ϵ_{ox} – dielektrična permeabilnost SiO_2

Triodni režim – zavisnost I_D od napona V_{GS}

- Prenosna karakteristika MOSFET-a u triodnom režimu

$$V_{GS} > V_{TH}$$

$$V_{TH} - V_{GS} < V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$$

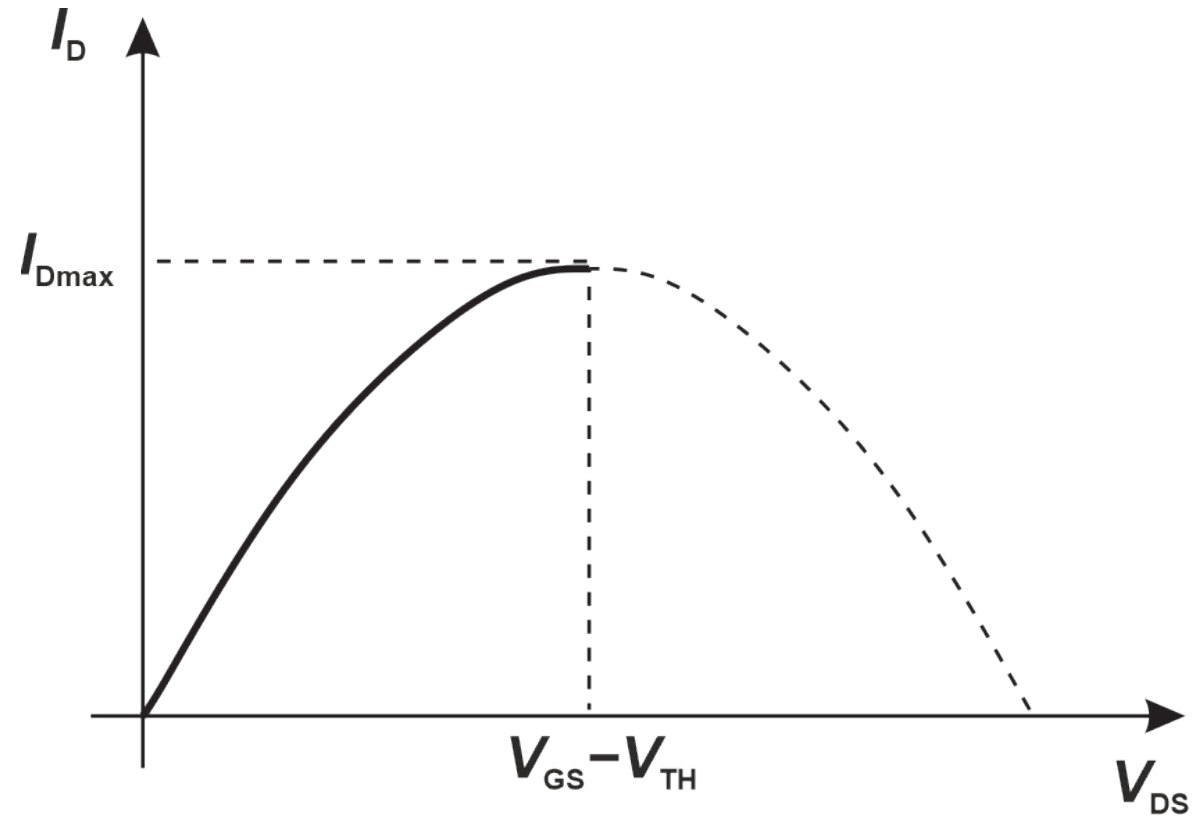


Triodni režim – zavisnost I_D od napona V_{DS}

- Izlazna karakteristika MOSFET-a, parabola
- Za $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$, struja I_D ima maksimalnu vrednost:

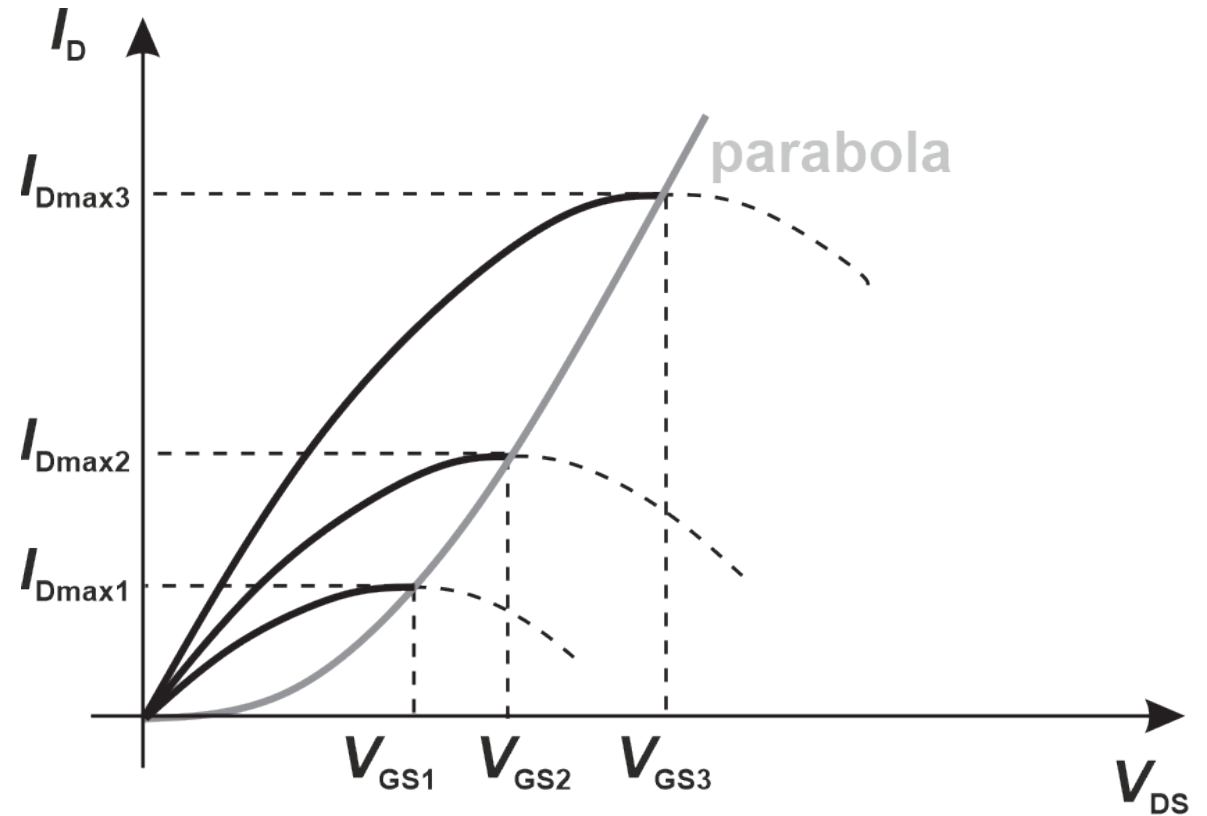
$$V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$$

$$I_{Dmax} = \frac{1}{2} \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2$$



Triodni režim – zavisnost I_D od napona V_{DS}

- Za različite vrednosti V_{GS} , familija karakteristika, maksimumi se nalaze na paraboli
- Za male vrednosti $V_{DS} \ll V_{GS} - V_{TH}$, kvadratni član u jednačini za struju kanala I_D možemo da zanemarimo, tako da ostaje linearna zavisnost.



Triodni režim – zavisnost I_D od napona $V_{DS} \ll V_{GS} - V_{TH}$

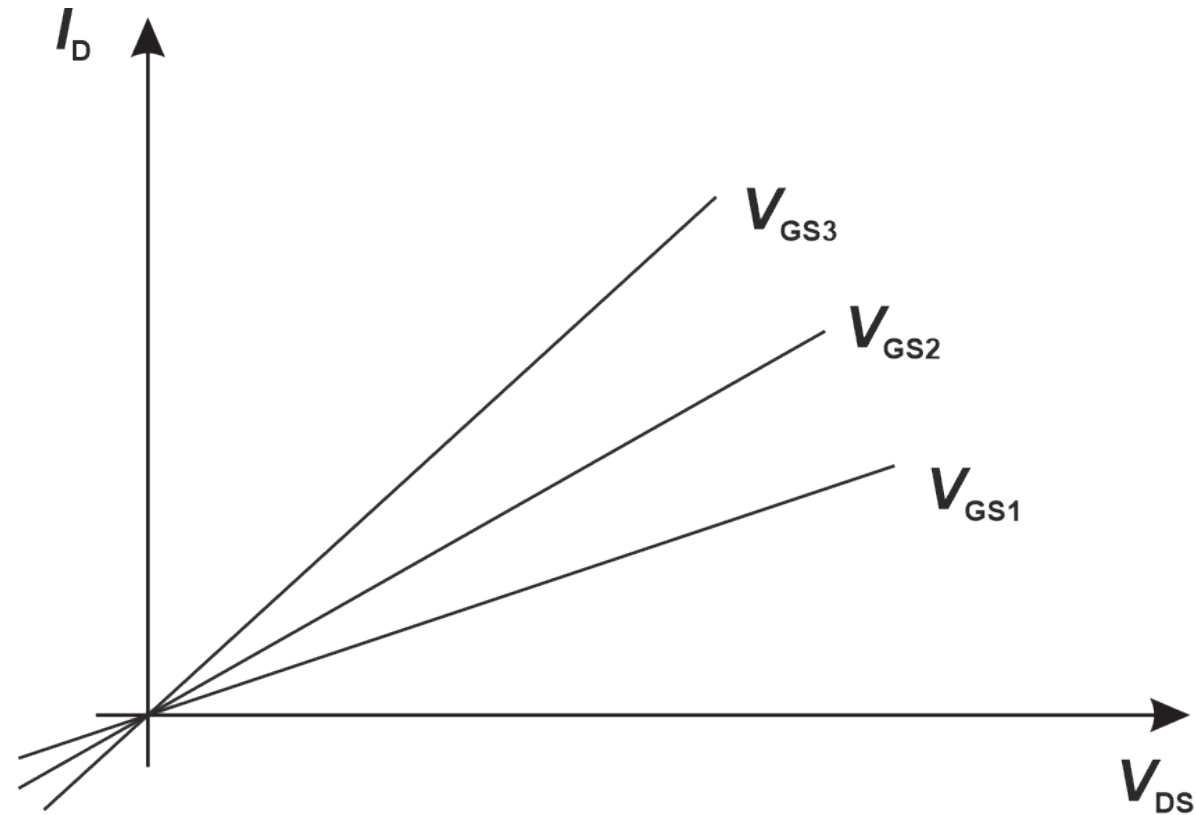
$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \cdot (2(V_{GS} - V_{TH}) \cdot V_{DS} - V_{DS}^2)$$

$$I_D \approx \underbrace{\mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{TH})}_{1/R_D} \cdot V_{DS}$$

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_D}$$

$$R_D = \frac{1}{\mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{TH})}$$

- Naponski kontrolisani otpornik R_D



Režim zasićenja

- Pri povećanju napona V_{DS} , dolazi do efekta prekida kanala, struja kanala I_D postaje približno konstantna u odnosu na promenu ovog napona.
- Struja kanala I_D ima **kvadratnu** zavisnost od napona V_{GS} i **linearnu** zavisnost od napona V_{DS} :

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2 \cdot (1 + \lambda V_{DS})$$

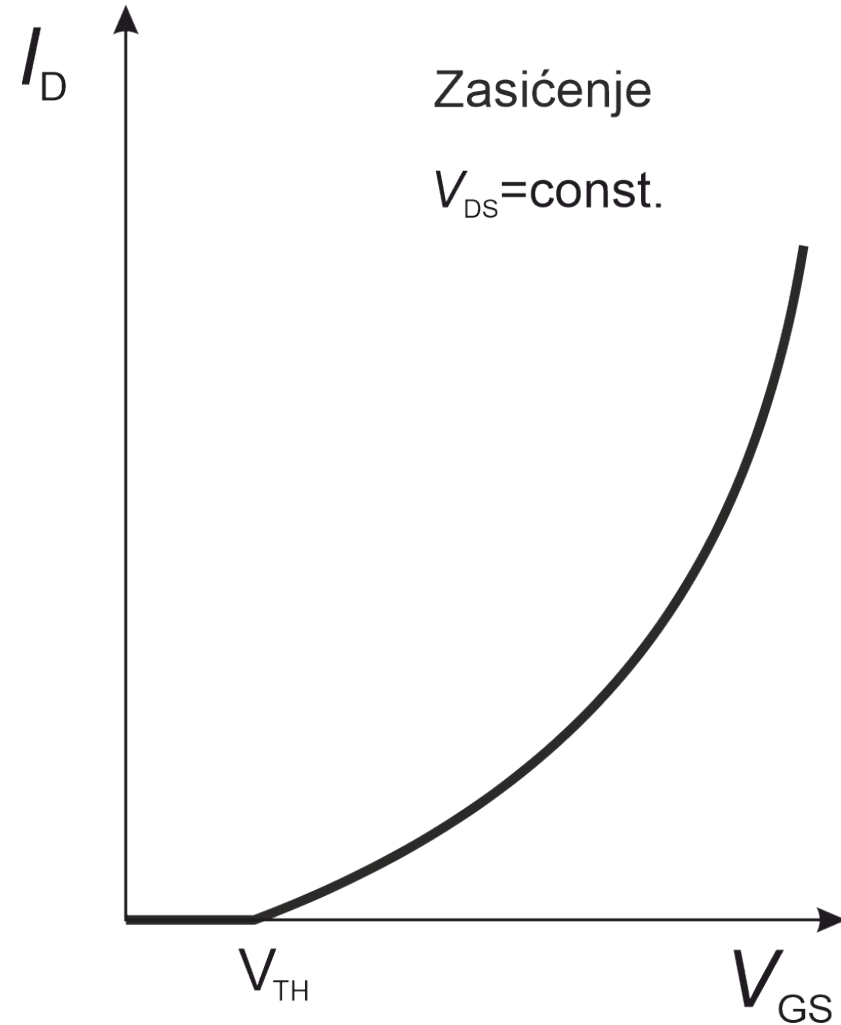
λ – koeficijent modulacije širine baze

Režim zasićenja – zavisnost I_D od napona V_{GS}

- Prenosna karakteristika MOSFET-a u režimu zasićenja

$$V_{GS} > V_{TH}$$

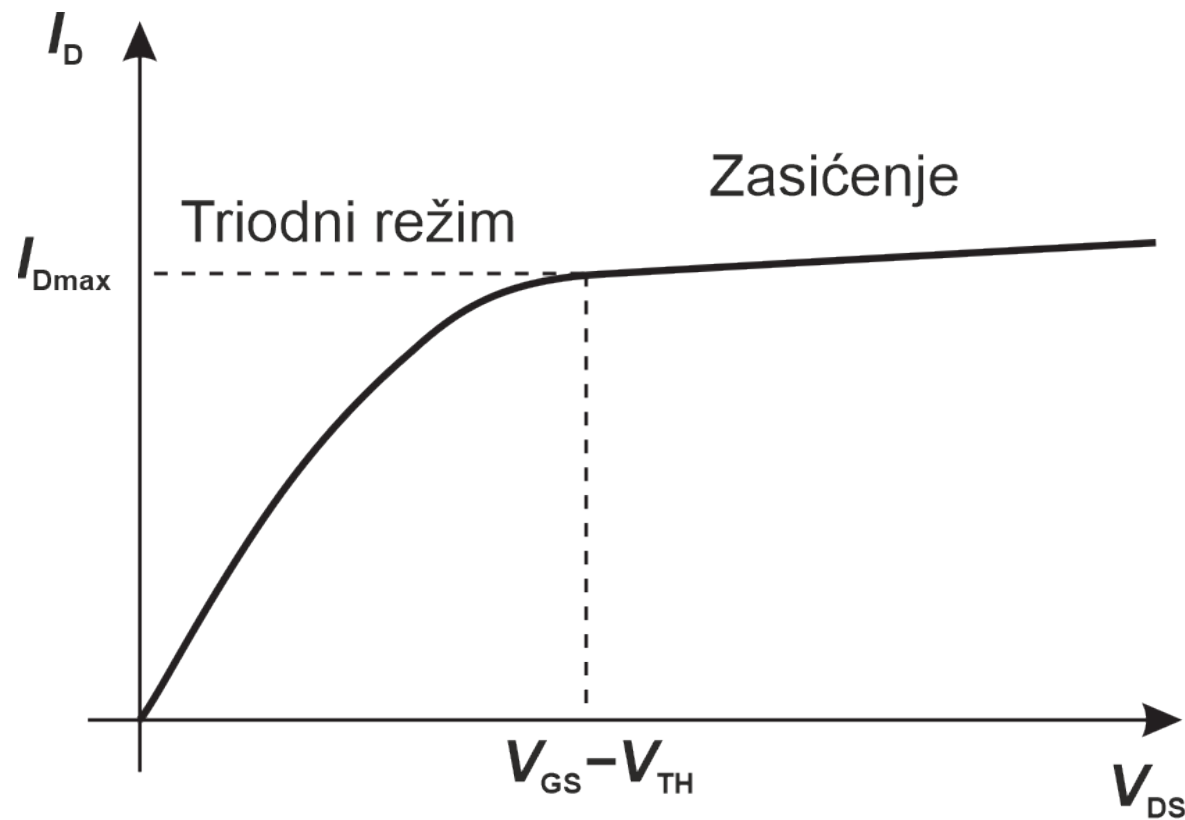
$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$



Režim zasićenja – zavisnost I_D od napona V_{DS}

- Za $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$, struja kanala je **približno konstantna**, MOSFET je u režimu zasićenja.

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$$



Struja kanala

- Pojednostavljenje izraza

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n \frac{\epsilon_{\text{ox}} W}{t_{\text{ox}} L} \cdot (V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}})^2 \cdot (1 + \lambda V_{\text{DS}})$$

$$I_D = \underbrace{\frac{1}{2} \mu_n \cdot V_{\text{TH}}^2 \cdot \frac{\epsilon_{\text{ox}} W}{t_{\text{ox}} L}}_{I_{\text{DS}}} \cdot \left(\frac{V_{\text{GS}}}{V_{\text{TH}}} - 1 \right)^2 \cdot (1 + \lambda V_{\text{DS}})$$

$$I_D = I_{\text{DS}} \cdot \left(\frac{V_{\text{GS}}}{V_{\text{TH}}} - 1 \right)^2 \cdot (1 + \lambda V_{\text{DS}})$$

Izlazna karakteristika MOSFET-a sa označenim režimima rada

