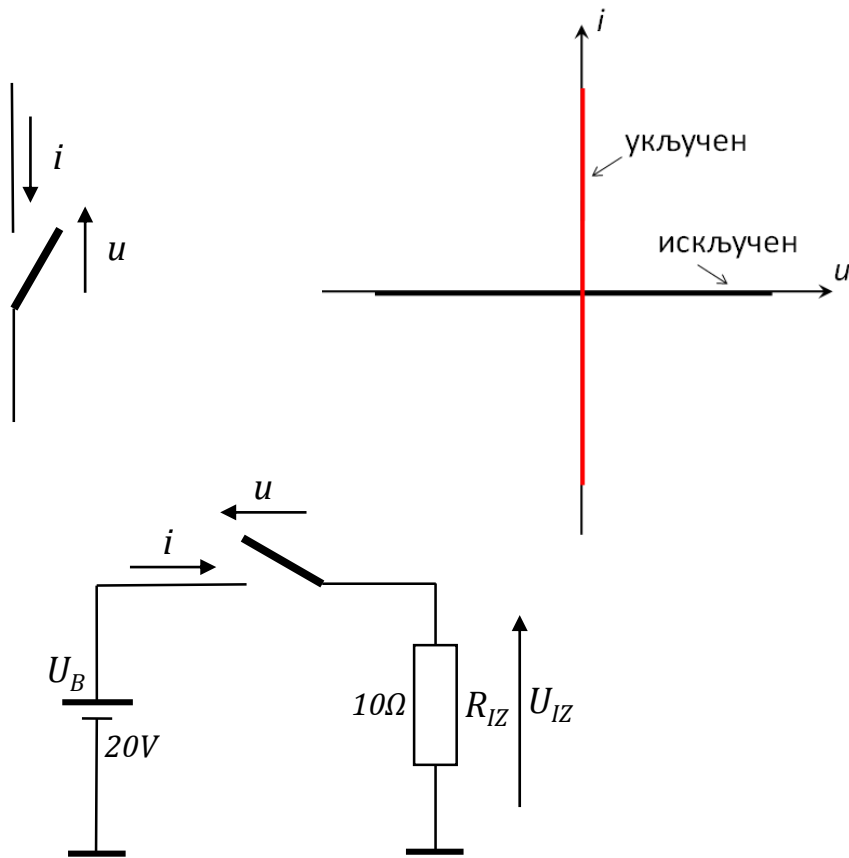


СНАЖНЕ ПОЛУПРОВОДНИЧКЕ КОМПОНЕНТЕ

- Прекидачки рад претварача омогућују снажне прекидачке полупроводничке компоненте.
- Опонашају рад савршеног прекидача:

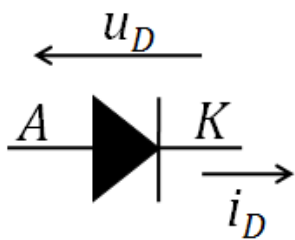


- особине:
 - у укљученом стању напон на крајевима прекидача је нула, а струју одређује остатак кола
 - у искљученом стању струја криз прекидач је нула, а напон на његовим крајевима одређује остатак кола
 - промена стања је тренутна
- остале особине пркидача:
 - пробојни напон позитивног и негативног поларитета
 - максимална вршна и средња струја
 - енергија потребна да држи прекидач у укљученом стању, искљученом стању и при промени стања

- *Подела основних полупроводничких компоненти према управљивости:*
(способности да се на упраљив начин укључе и управљив начин искључе)

неуправљива	полууправљива	пуноуправљиве
диода	тиристор (управљиво укључење)	транзистори: биполарни, <i>MOSFET</i> , <i>IGBT</i> пуноуправљиви тиристори: <i>GTO</i> , <i>IGCT</i>

- снажна диода

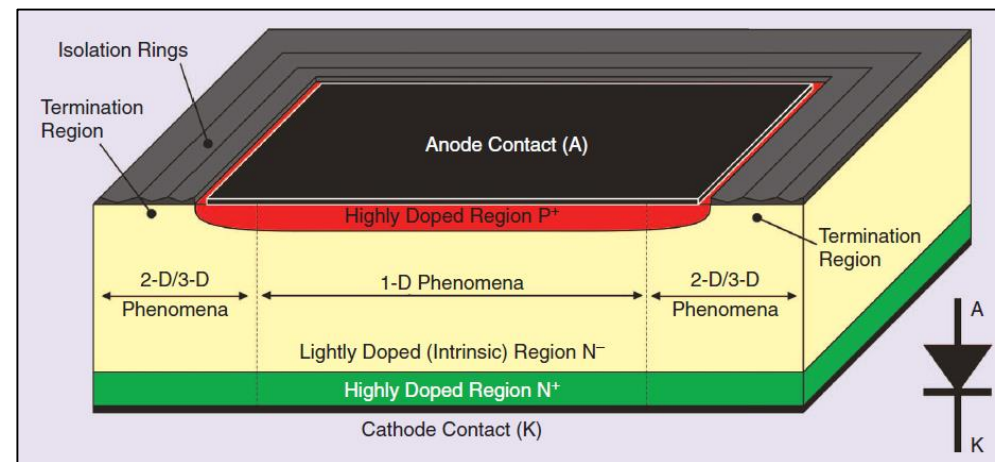


A – анода K – катода

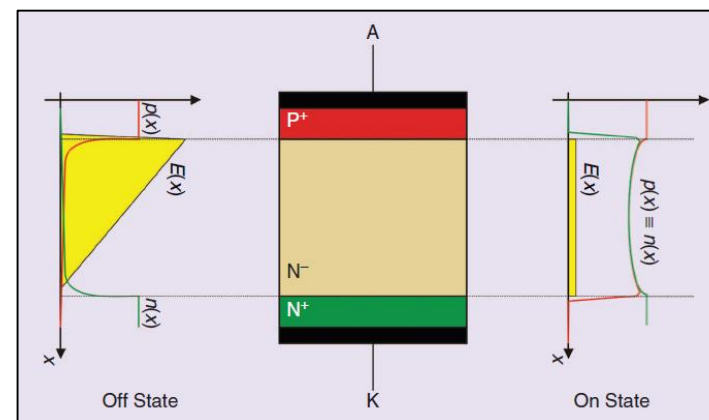
облици кућишта:



поставка снажне PIN диоде:

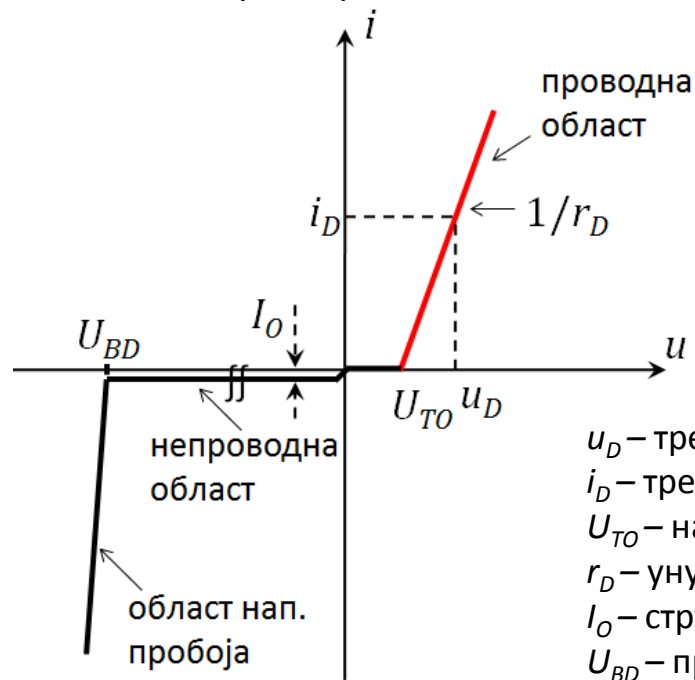


просторна расподела величина
(шупљина - p , електрона - n и јечине поља - E):

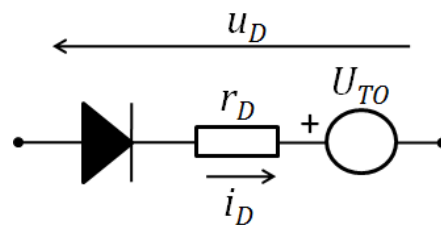


- снажна диода

статичка карактеристика:



представа у проводном стању:



$$u_D = U_{TO} + r_D \cdot i_D$$

u_D – тренутна вредност напона
 i_D – тренутна вредност струје
 U_{TO} – напонски праг провођења
 r_D – унутрашња отпорност
 I_O – струја цурења
 U_{BD} – пробојни напон

услови за укључење и искључење:

- укључење: $u_D > U_{TO}$
- искључење: $i_D < 0$

исправљачка диода:

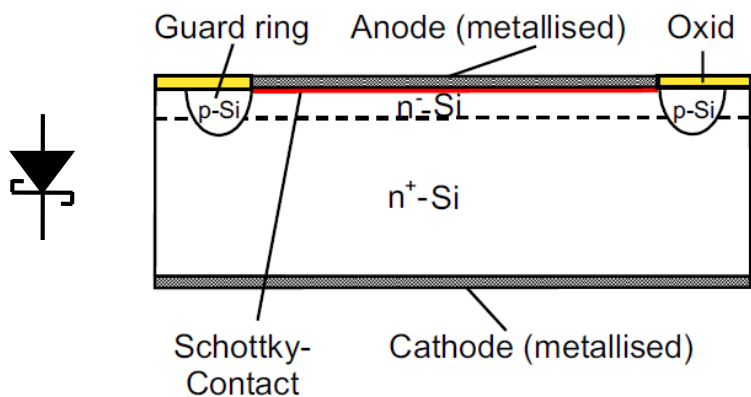
Намењена за рад на 50Hz / 60Hz учестаности.

Основне особине:

- мали пад напона у проводном стању
- велика густина струје I_F
- велика струјна преоптеретивост ($I_{FSM-10ms} \approx 10 \cdot I_F$)
- висока краткотрајна вредност инверзног напонског удара ($< 1ms$)

- снажна Шотки (eng. Schottky) диода

ознака и поставка Шотки (eng. Schottky) диоде:



Спој метал – полупроводник (Schottky контакт) има улогу полупроводничког споја.

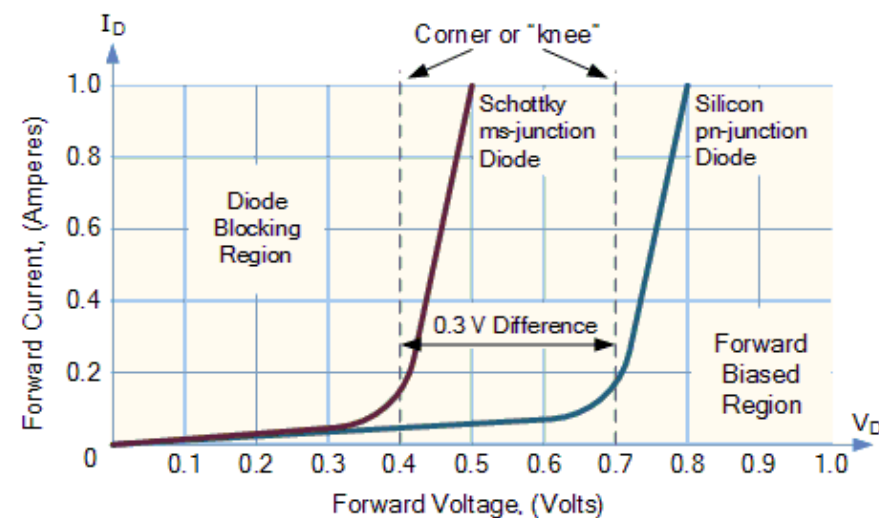
Носиоци наелектрисања су само електрони - униполарна компонента, за разлику од PIN диоде која је биполарна.

Због мале баријере у потенцијалима крајева споја постоји мали праг провођења $U_{TO} \approx 0,3V$ (код PIN $0,6V$) и мањи напон у проводном стању.

Максимални пробојни напон Шотки диода на бази Si је до 200V.

Али, максимални пробојни напон Шотки диода на бази SiC је до 1200V.

статичка карактеристика:



- брзе диоде

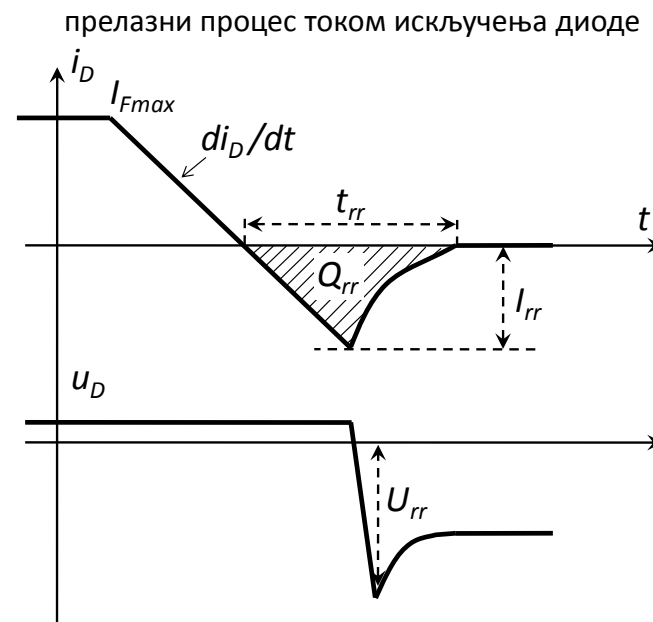
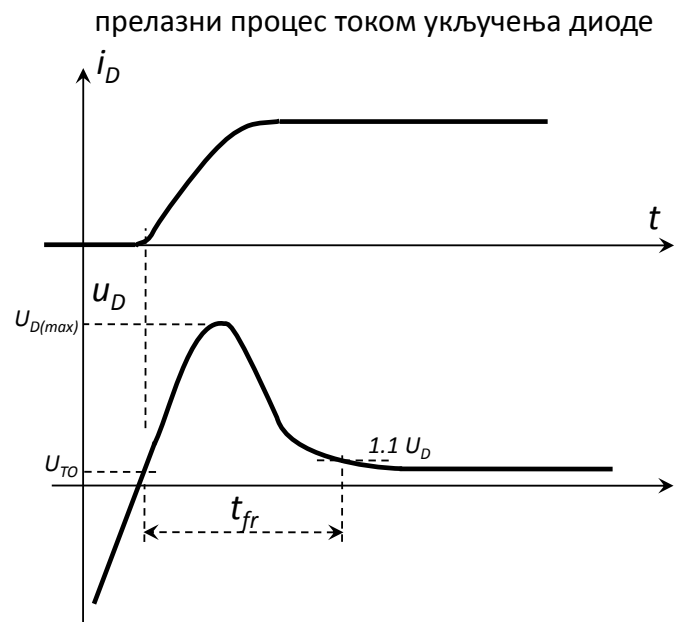
Намењене за рад у спрези са транзисторима на учестаностима од $10 \text{ kHz} \div 1 \text{ MHz}$.

Основне особине:

- пригушен прелазни период укључења и искључења
- оптималан однос пада напона у стању провођења U_D , сртује рекомбинације I_{rr} и струје цурења

динамичке карактеристике брзих *PIN* диода:

(тзв. *soft recovery diodes*, *fast recovery diodes*, *controlled axial lifetime - CAL diodes*)



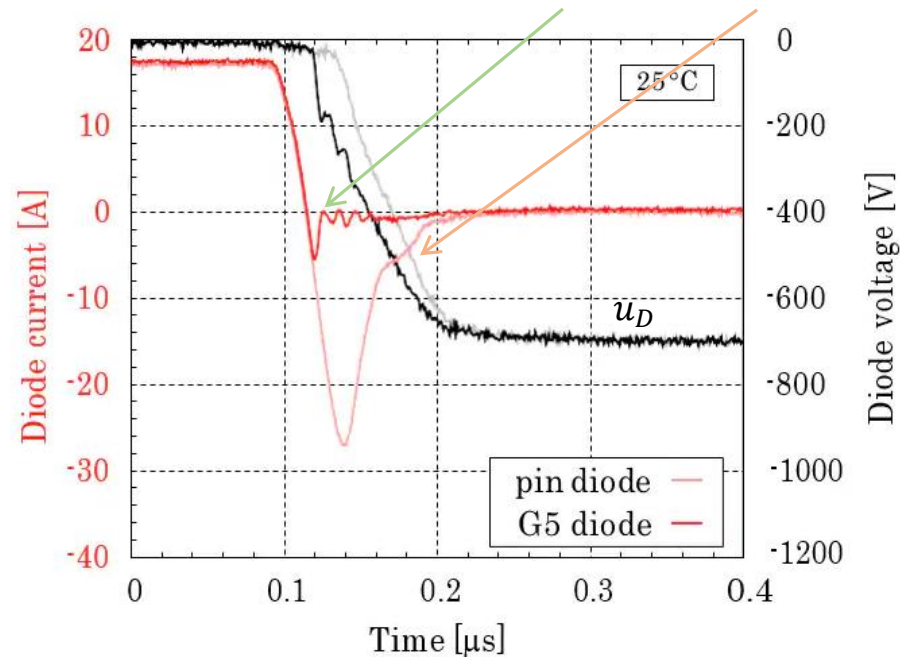
Највећи проблем представља струја рекомбинације слободних носилаца наелектрисања и успостављање баријере током процеса искључења, I_{rr} . Вредност I_{rr} зависи пре свега од брзине промене струје током искључења di_D/dt . Вредност I_{rr} је реда величине претходно затечене струје, I_{Fmax} . Количина наелектрисања која се рекомбинује, Q_{rr} , одређује губитке у диоди и осталим компонентама кола кроз које тече струје рекомбинације.

*) *rr* – *reverse recovery* (рекомбинација слободних носилаца)

- брзе диоде

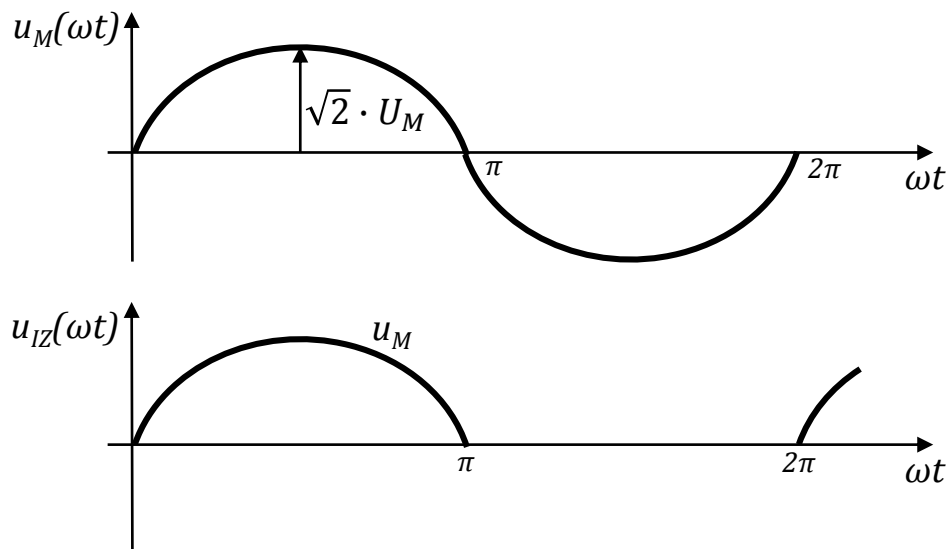
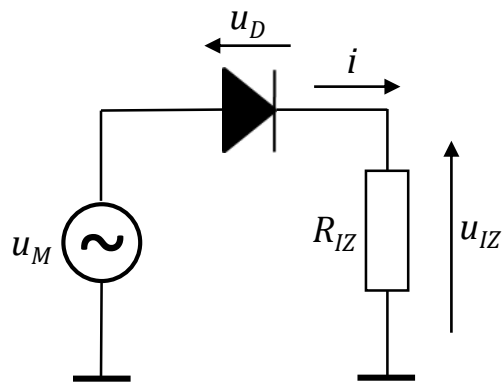
динамичке карактеристике брзе Шотки диоде:

поређење процеса искључења брзе Шотки диоде и *PIN* диоде

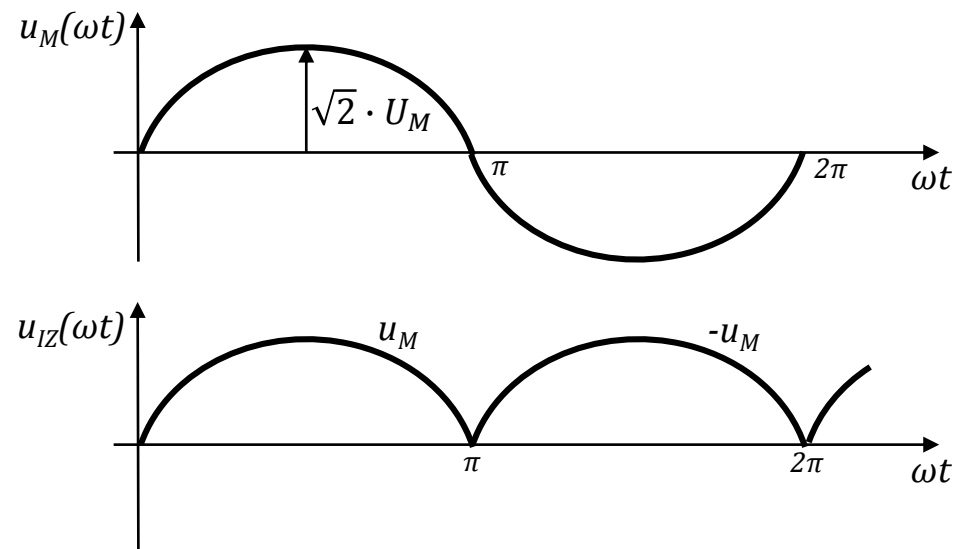
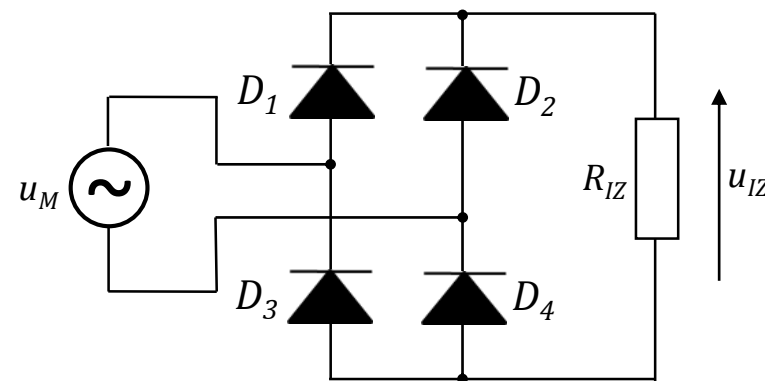


Не постоји нагомилавање мањинских наелектрисања током провођења – не постоји струја рекомбинације I_{rr} , а тиме су прекидачки губици су минимални.

- *примери рада једноставних кола са диодом*
полуталасни исправљач са отпорним потрошачем:

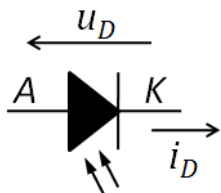


- пуноталасни исправљач са отпорним потрошачем:

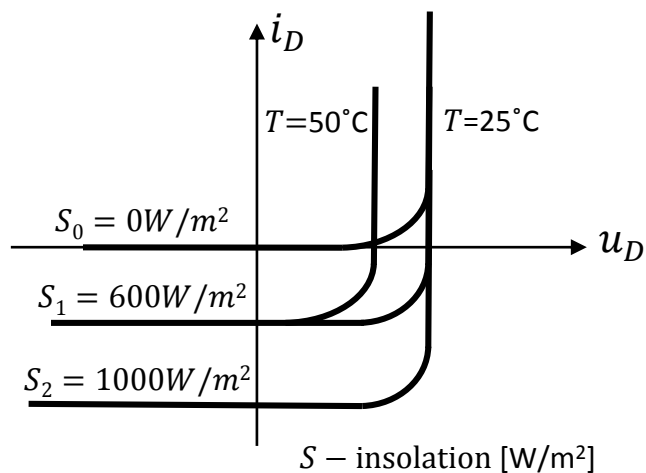


- фото диода – фотонапонски панел

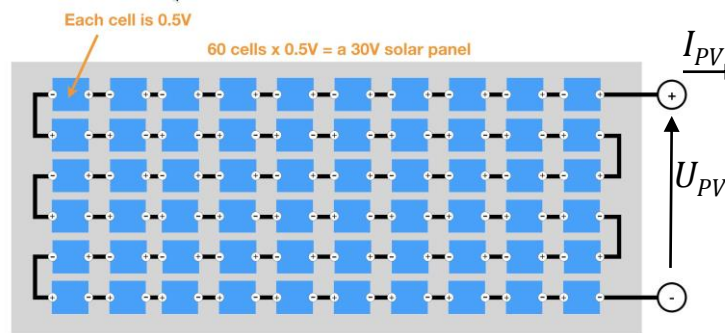
фото диода:



статичка карактеристика фото диоде:

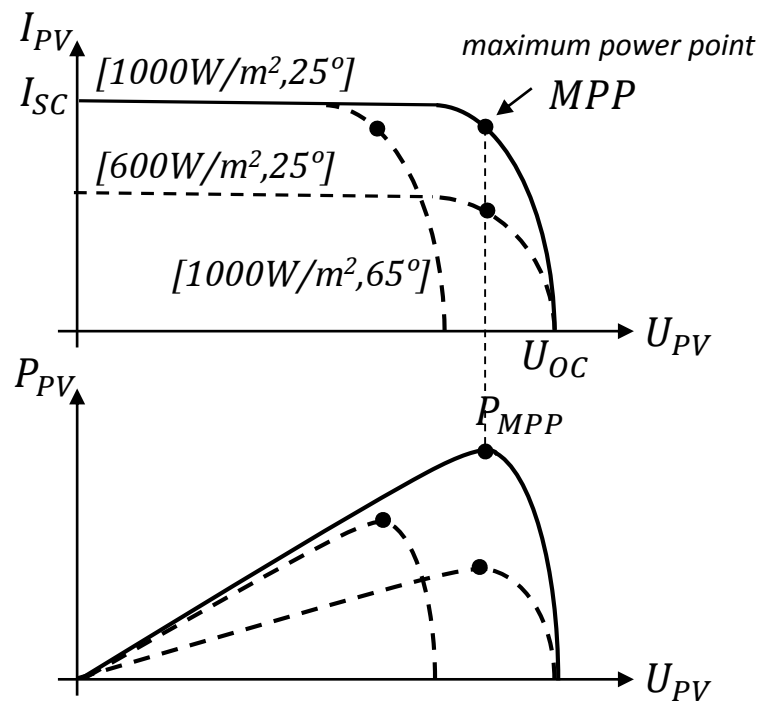


карактеристика фотонапонског панела:

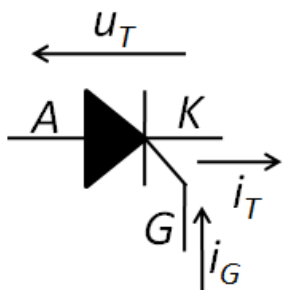


$$I_{SC} = 10A, U_{OC} = 30V$$

Редним везивањем фотонапонских панела добија се укупан генерисан напон који је погодан за даље претварање у ток енергије према електричној мрежи. Обично: $U_{OCuk} = 8 \times 30V = 240V$



- Тиристор



A – анода K – катода G – гејт

облици кућишта:



кућиште са навојем

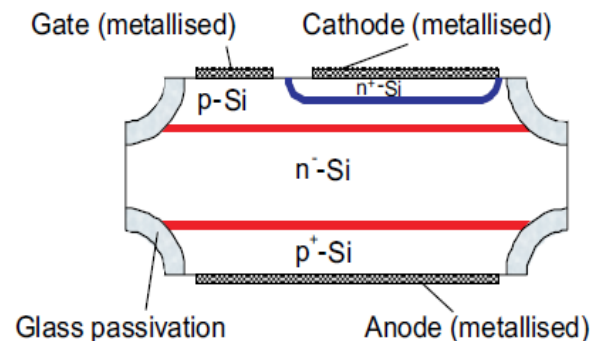


сендвич кућиште са изгледом Si плочице

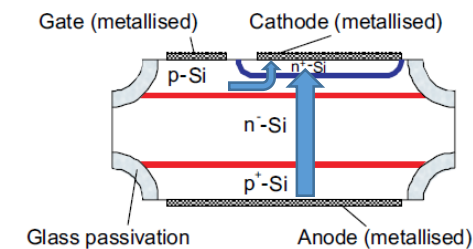


модул

поставка тиристора:

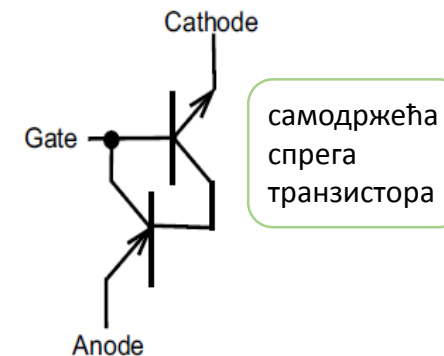
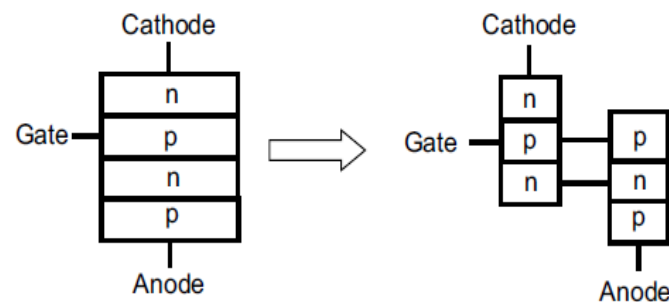


укључење тиристора:



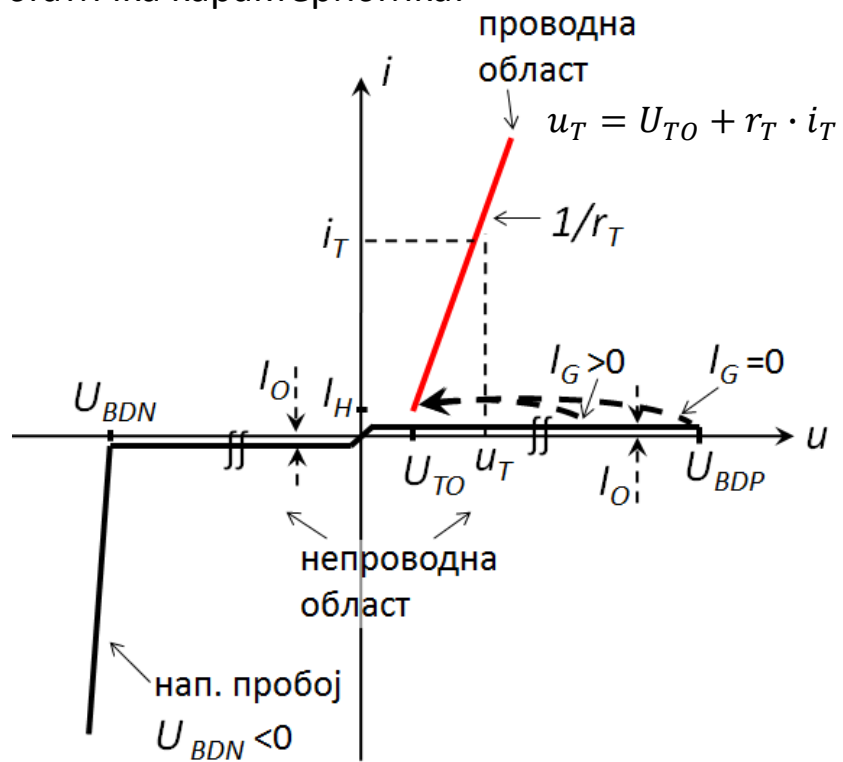
Струја гејта доводи до преливања N носилаца из споја катоде у спој гејта чиме се успоставља струја од аноде до катоде која додатно пуни P слој гејта N носиоцима.

заменска представа тиристора:



- Тиристор

статичка карактеристика:

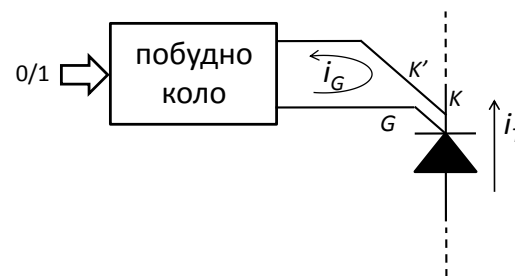


услови за укључење и искључење:

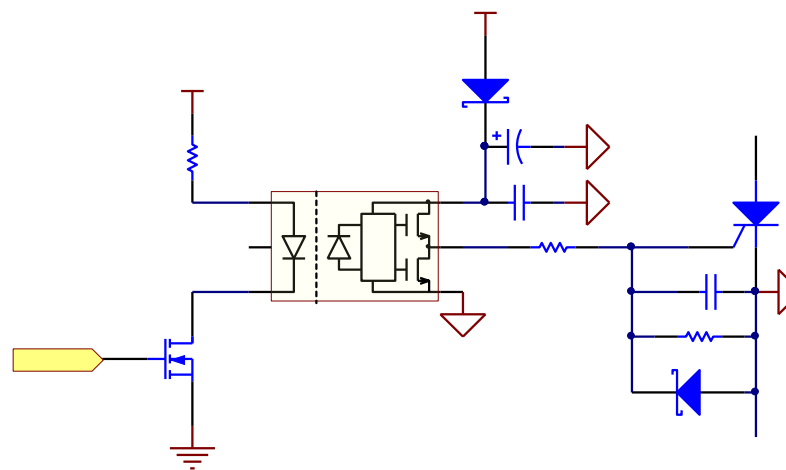
- укључење: $u_T > U_{TO} + i_G > I_{Gmin}$
- искључење: $i_T < I_H$

побуда тиристора:

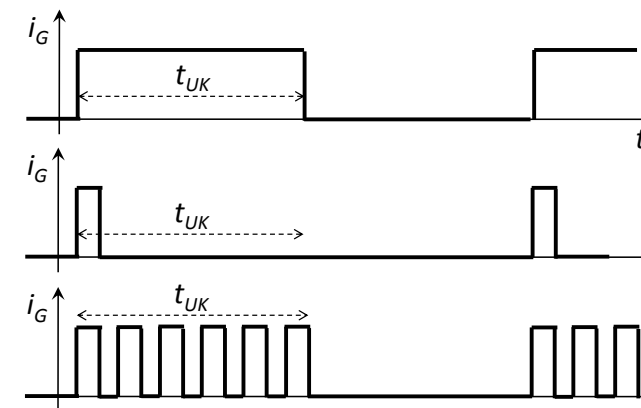
повезивање побудног кола:



пример побудног кола:

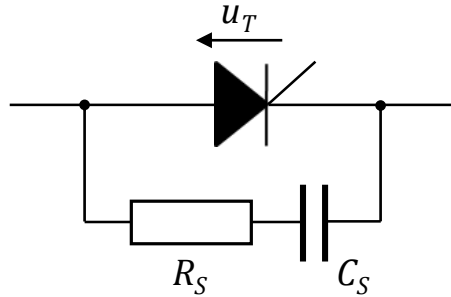


облици струје побуде:

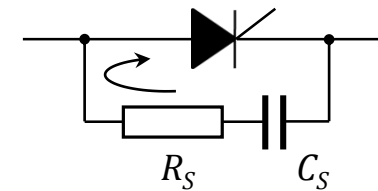


- Тиристор

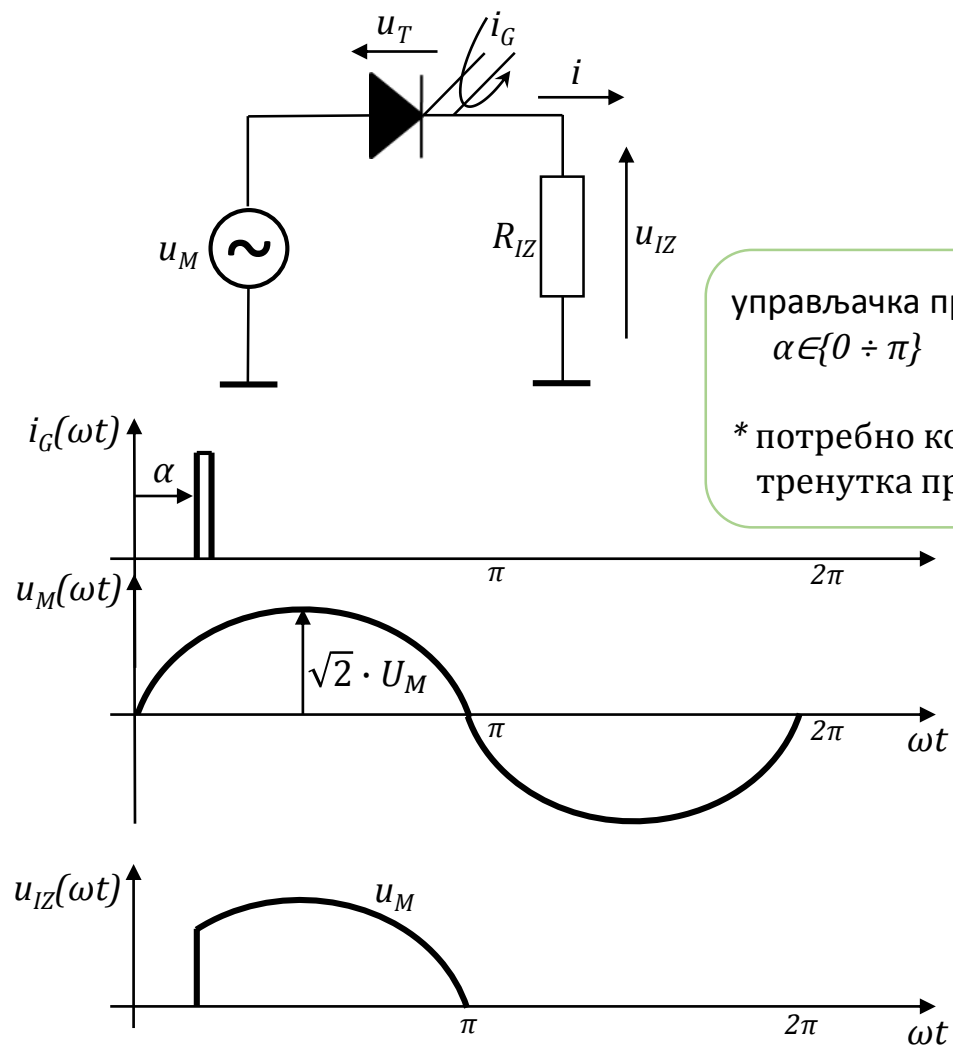
dv/dt заштита:



- брза промена напона на тиристор du_T/dt , посредством капацитивне струје кроз непропусно поларисан PN спој, може проузроковати паразитно укључење тиристора
- C_S ограничава брзину промене u_T
- R_S ограничава струју пражњења C_S од тренутка када се тиристор укључи

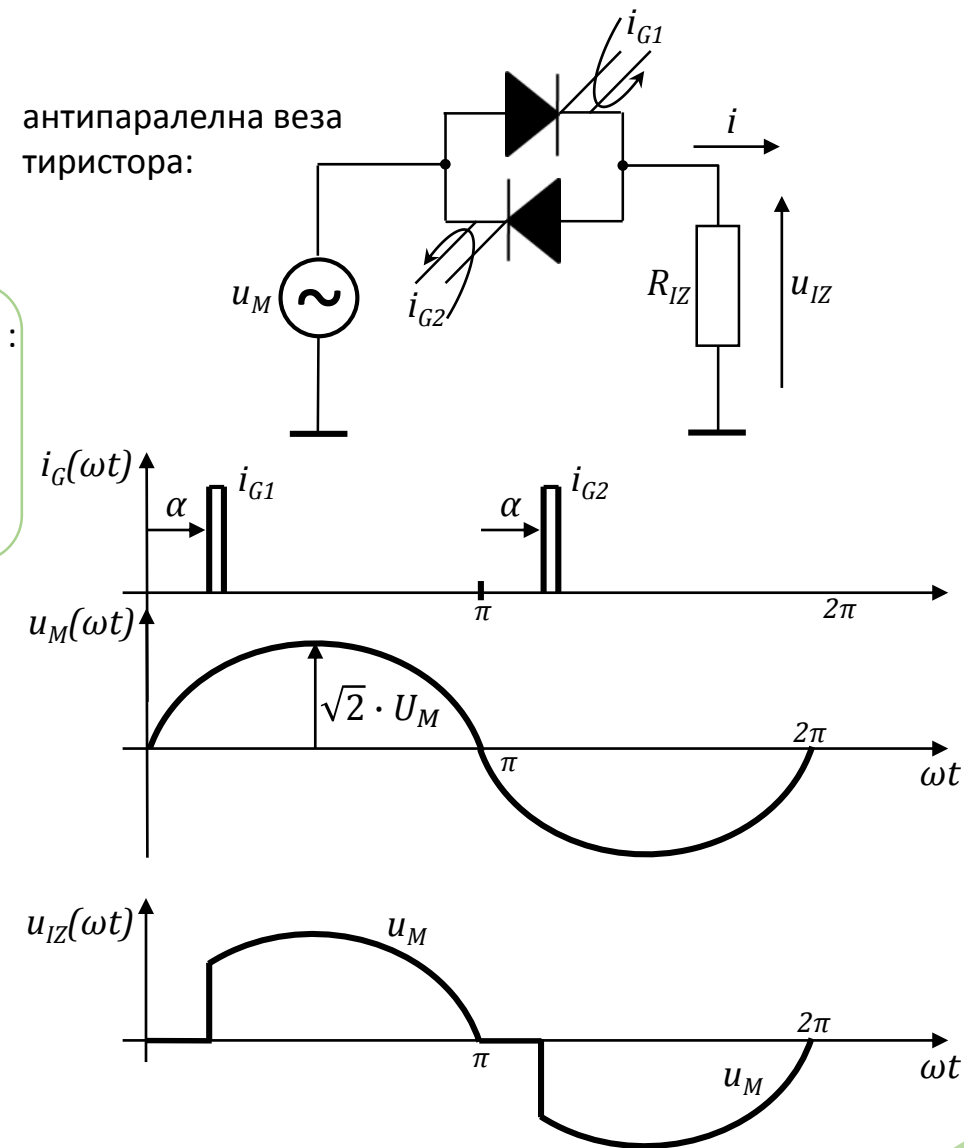


- *примери рада једноставних кола са тиристором*



управљачка променљива - **угао укључења** :
 $\alpha \in \{0 \div \pi\}$

* потребно коло за одређивање
 тренутка пресека u_M са нулом



- *Снажни прекидачки транзистори:*
 - *биполарни транзистор*
 - *MOSFET*
 - *IGBT*

облици кућишта:



модул

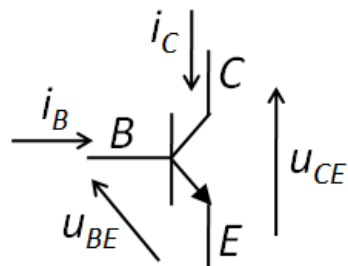


кућиште за лемљење
кроз штампану плочу



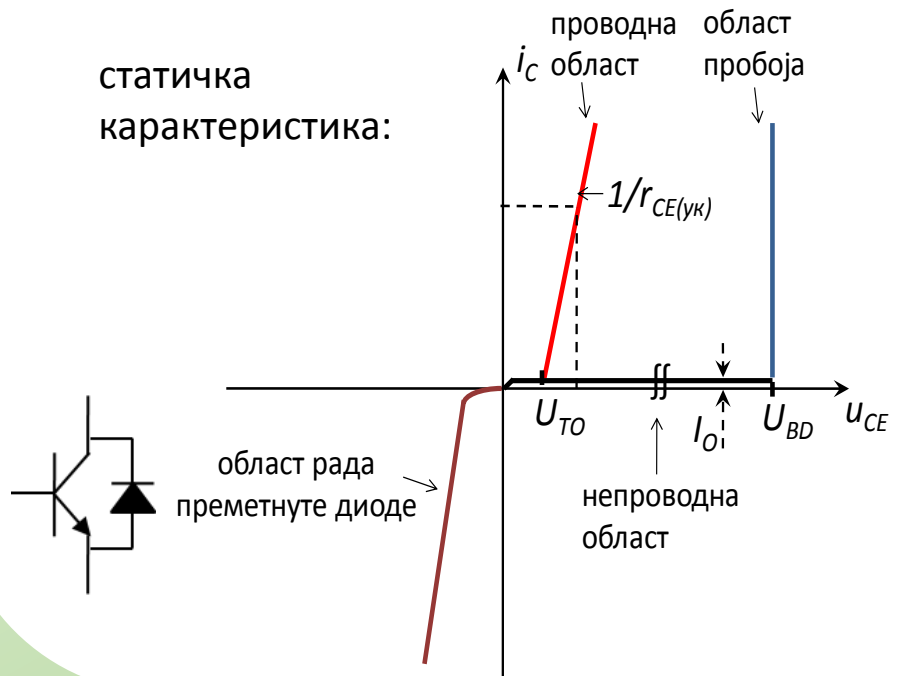
кућиште за површинско
лемљење

- Снажни биполарни транзистор:

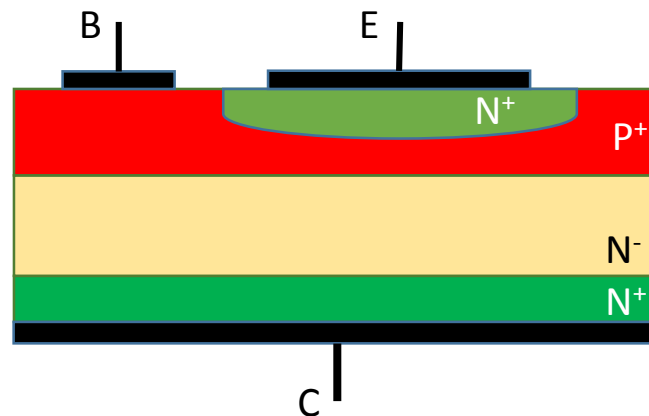


B – база C – колектор E – емитер

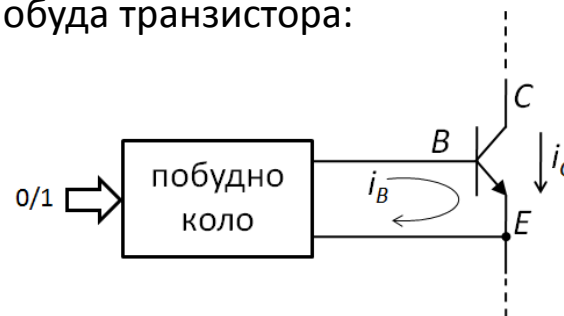
статичка
карактеристика:



поставка снажног транзистора:



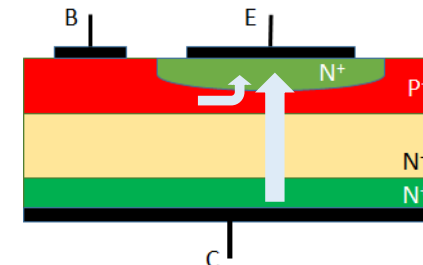
побуда транзистора:



општи услов $u_{CE} > 0$,

- укључење: $i_B > I_{Cmax} / h_{FE}$
- искључење: $i_B = 0$

укључење транзистора:



Струја базе доводи до преливања N носилаца из споја емитера у спој базе чиме се успоставља струја од колектора до емитера.

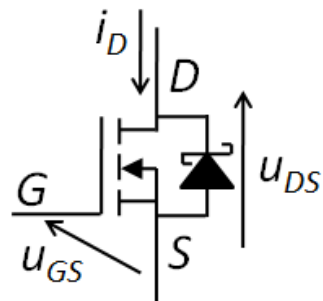
Ток струје остварују и N и P носиоци наелектрисања због чега се транзистор зове биполарни.

Динамичка нестабилност:

секундарни пробој проузрокован негативним температурним коефицијентом ($T \uparrow h_{FE} \uparrow$) односно „термичким бежањем“ дела компоненте; окидач за појаву су велике вредности тренутне снаге губитака током промене стања.

Биполарне компоненте имају U_{TO} , малу унутрашњу отпорност r_{CE} и негативн температурни коефицијент. Он чини да се транзистори не могу повезати паралелно да би се повећале струјне могућности.

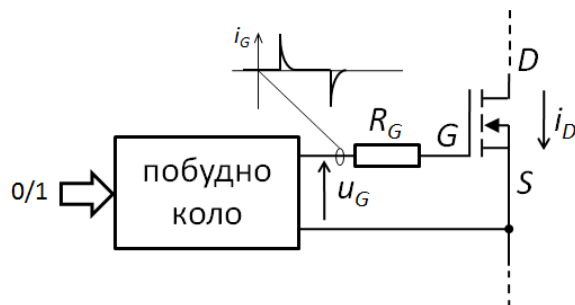
- MOSFET:**



G – гејт D – дрејн S – сорс

MOSFET је основна јединица дигиталне електронике - логичких кола, меморијских кола, процесора, итд, захваљујући малим размерама и великој брзини прекидања. У енергетској електроници MOSFET је незаменљива компонента на малим снагама и компоненета која омогућује упоредиво високе учестаности прекидања (до 1MHz).

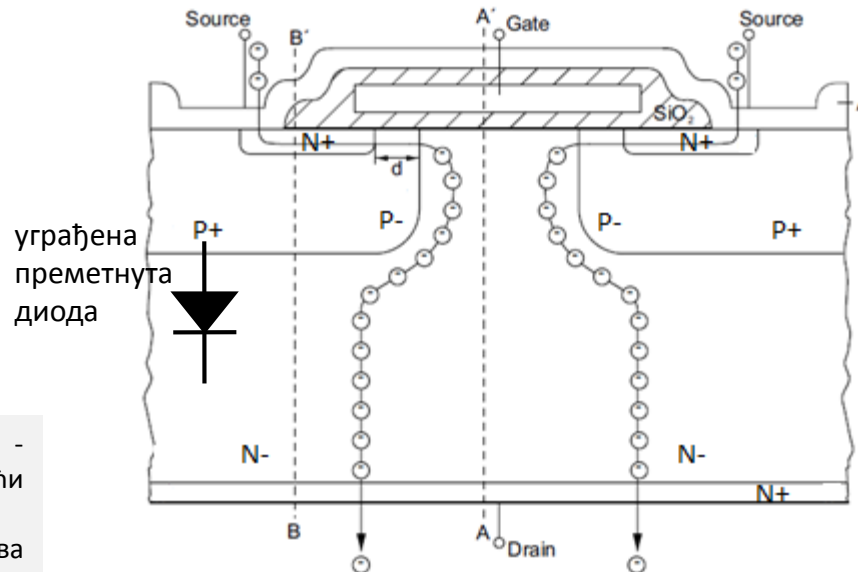
побуда транзистора:



општи услов $u_{DS} > 0$,

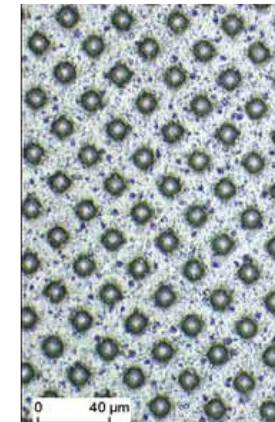
- укључење: $u_G \in \{12V \div 15V\}$
- искључење: $u_G \in \{0V \div -15V\}$

поставка снажног MOSFET-а:
(Metal – Oxid – Semiconductor – Field – Effect – Transistor)



ћелија MOSFET-а у стању провођења

Струју провођења чине само електрони - MOSFET је униполарна компонента.

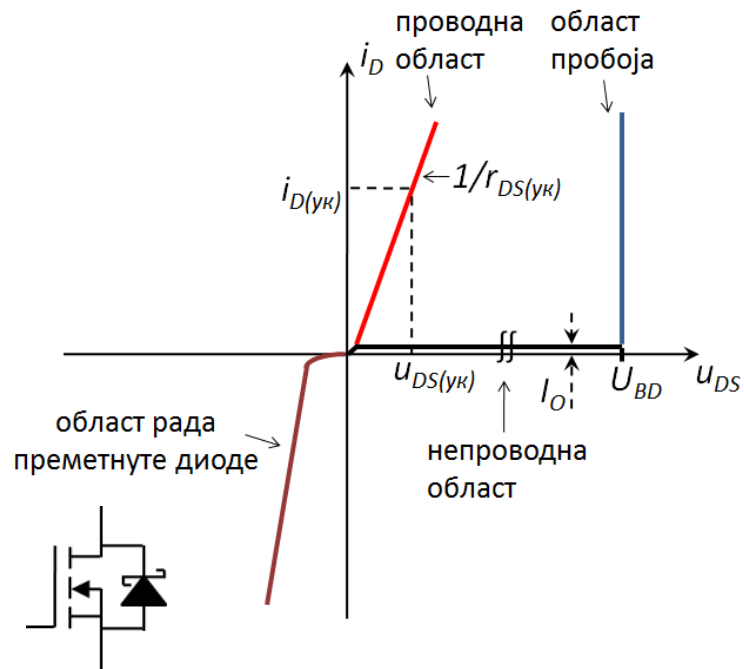


снажан MOSFET чини неколико стотина хиљада ћелија повезаних паралелно

Као униполарна компонента MOSFET има изражен позитиван температурни коефицијент зависности u_{DS} и i_D . Ово омогућује паралелно повезивање ћелија и паралелно повезивање транзистора у сврху повећања струјних могућности.

- MOSFET:**

статичка карактеристика:



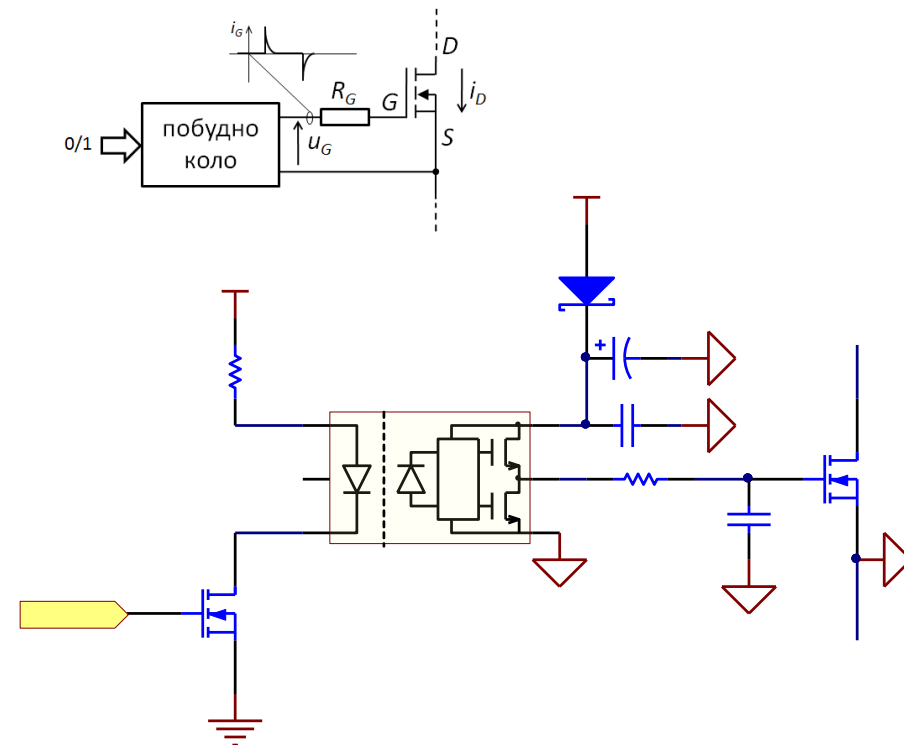
Због упоредиво лошијих особина уграђена преметнута диода може бити премоштена Шотки диодом, најчешће уграђеном у кућиште транзистора.

MOSFET као униполарна компонента има упоредиво лошије особине у стању провођења од биполарних компоненти, што се огледа у већој унутрашњој отпорности r_{DS} и мањој дозвољеној густини струје за исту вредност пробојног напона U_{BD} .

Као униполарна компонента MOSFET нама праг провођења у карактеристици проводне области.

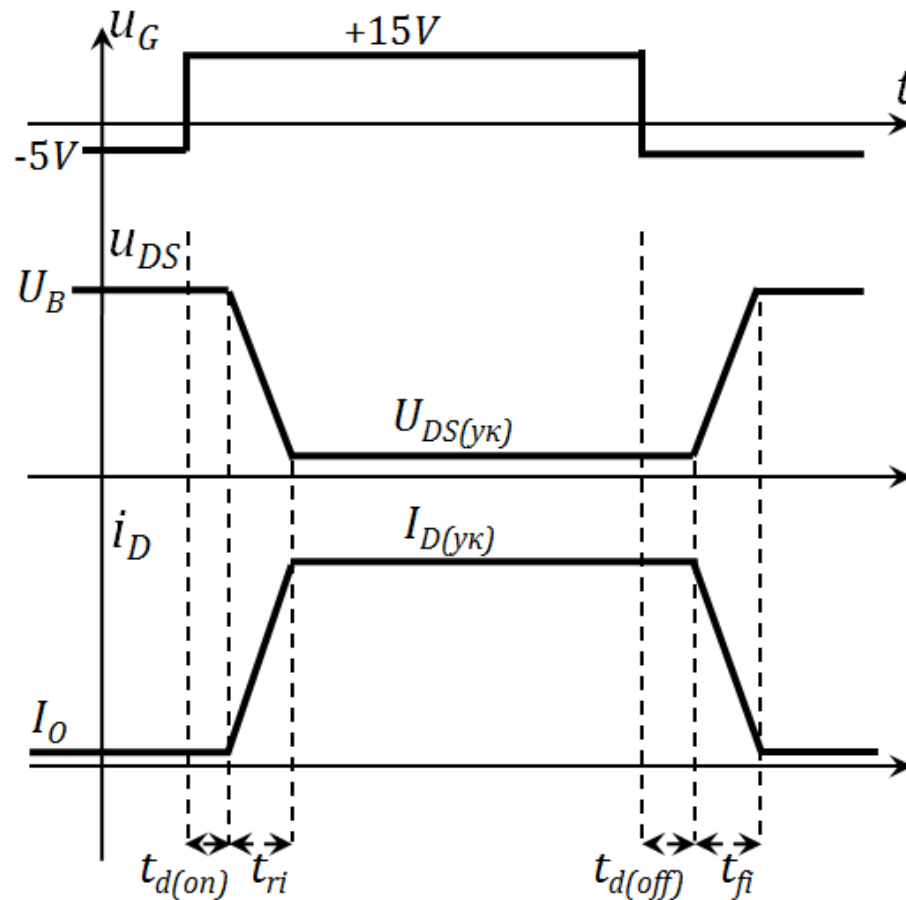
У Si технологији MOSFET се израђује до радних напона око 600V, док се у SiC технологији израђује за рад до 1200V.

пример побудног кола:



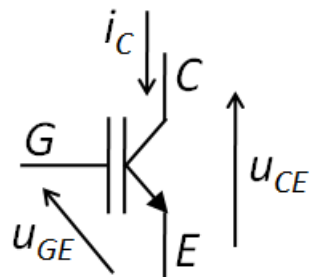
- MOSFET:**

динамичке карактеристике:



Како струју проводе само негативни носиоци наелектрисања, MOSFET има изузетно кратка времена преласка у укључено стање, t_{ri} , и искључено стање, t_{fi} , која омогућују високе учестаности прекидања.

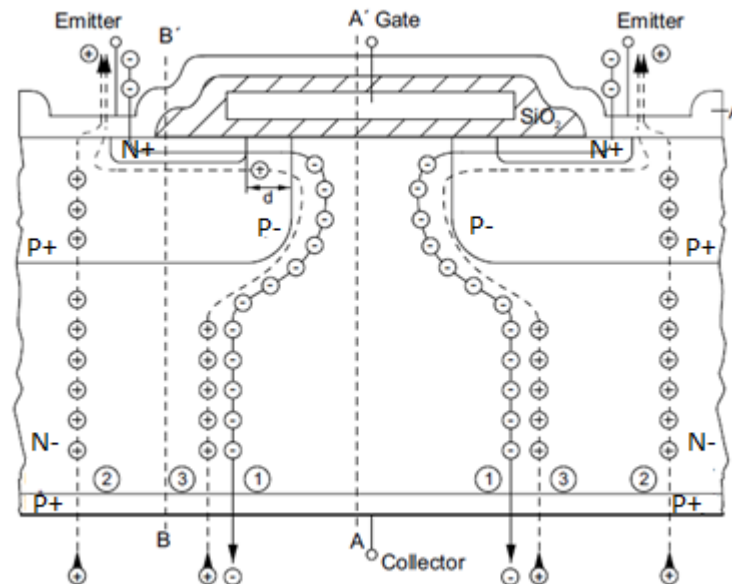
• IGBT:



G – гејт C – колектор E – емитер

IGBT је основна компонента енергетске електронике на средњим снагама ($i_C < 100A$, $u_{CE} < 6,6kV$). Омогућују брзине прекидања у опсегу средњих вредности, око $10kHz$.

поставка снажног IGBT-а:
(Insulated – Gate – Bipolar – Transistor)



ћелија IGBT-а у стању провођења

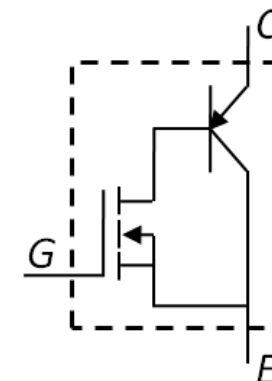
Струју провођења i_C чине и електрони и шупљине - IGBT је биполарна компонента. Ово омогућује знатно веће густине струје у поређењу са MOSFET-ом.

општи услов $u_{CE} > 0$,

- укључење: $u_G \in \{12V \div 15V\}$
- искључење: $u_G \in \{0V \div -15V\}$

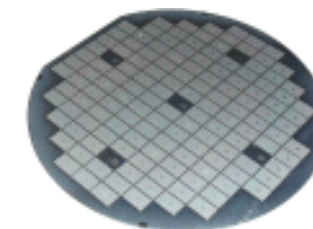
Истоветно као за MOSFET.

Готово истоветна побудна кола се могу користити код MOSFET-а и IGBT-а.



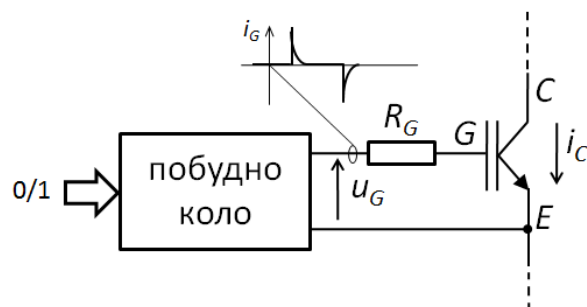
заменска представа IGBT-а

IGBT је настао уношењем у поставку MOSFET-а (улазна страна), елемената биполарног транзистора (излазна страна).



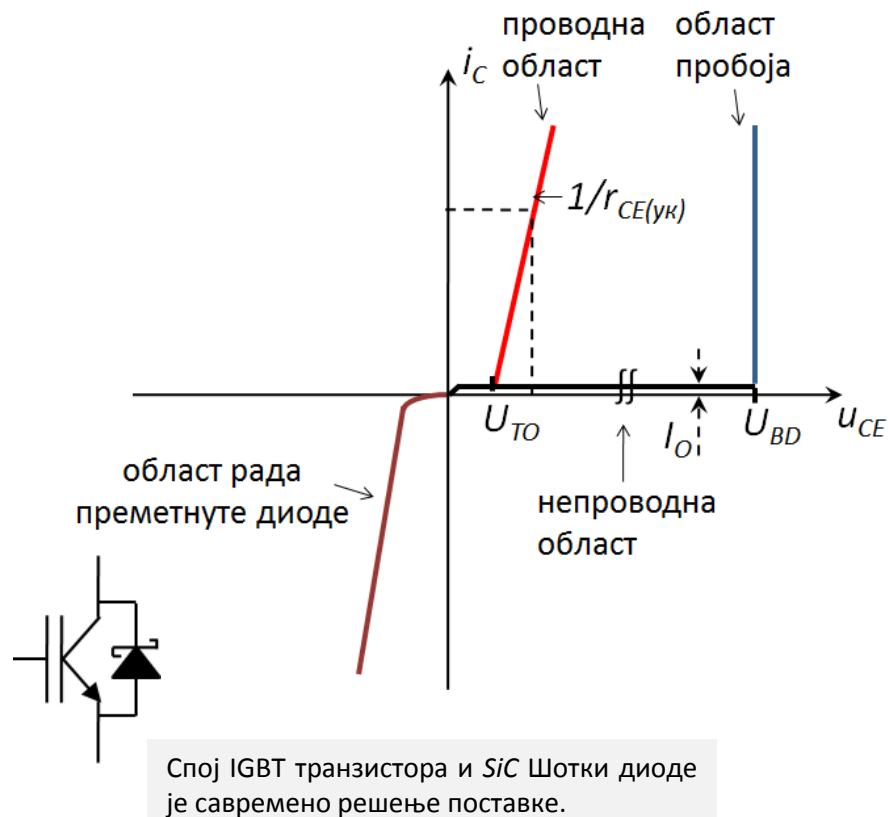
Si плочица на којој је израђено више IGBT транзистора

побуда транзистора:



- **IGBT:**

статичка карактеристика:



IGBT као биполарна компонента има праг провођења у карактеристици проводне области, али и упоредиво боље особине у стању провођења од MOSFET-а, што се огледа у мањој унутрашњој отпорности r_{DS} и већој дозвољеној густини струје за исту вредност пробојног напона U_{BD} .

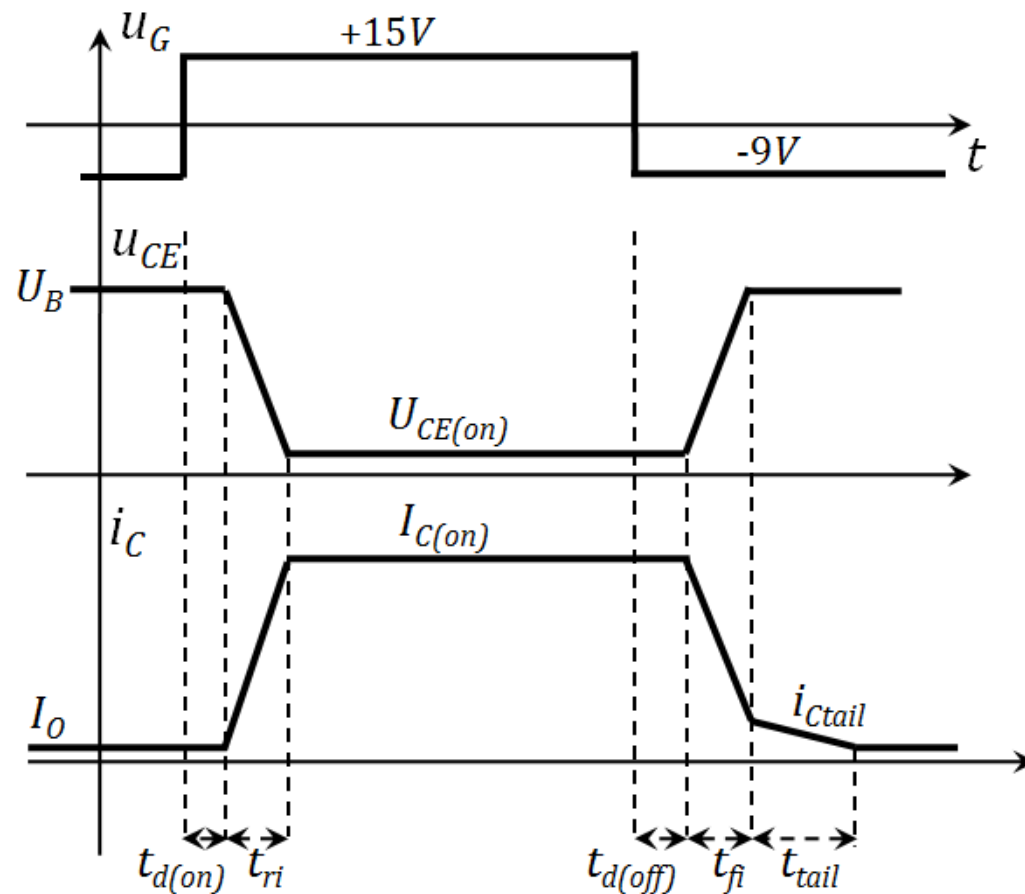
IGBT се израђује тренутно у Si технологији до радних напона око 3300V.

Савремени IGBT транзистори имају позитиван температурни коефицијент зависности u_{CE} и i_C за напон u_{GE} у називном опсегу (типично $u_{GE} > 9V$). Међутим, због значајне разлике у прагу провођења и укупном напону провођења, при њиховом паралелном повезивању компоненте неће равномерно поделити струјно оптерећење. Стога је потребно установити тачне карактеристике и на основу њих упарити оне транзисторе који имају блиске податке.

Слично важи и за карактеристике и упаривање праметнутих диода.

- IGBT:

динамичке карактеристике:

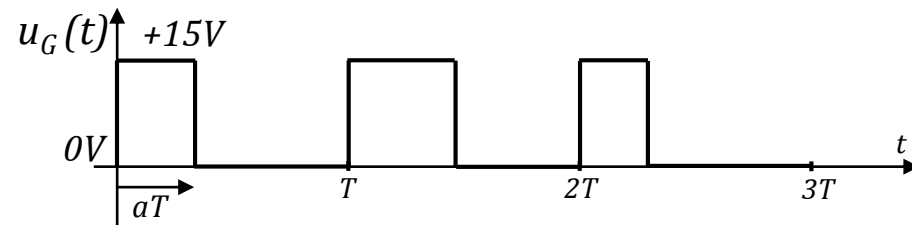


Како струју проводе и позитивни и негативни носиоци наелектрисања, IGBT има за ред величине ($\times 10$) дужа времена преласка у укључено стање, t_{ri} , и искључено стање, t_{fi} . Самим тим учестаности прекидања су сразмерно мања.

У прелазном периоду искључења јавља се струја репа i_{Ctail} , која продужава време искључења.

- *Управљање транзисторима* – импулсно-ширинска модулација:

основа приступа:



Основни параметри модулисане величине:

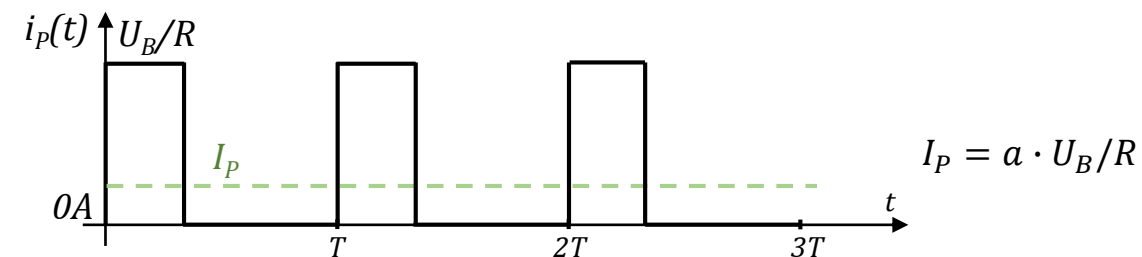
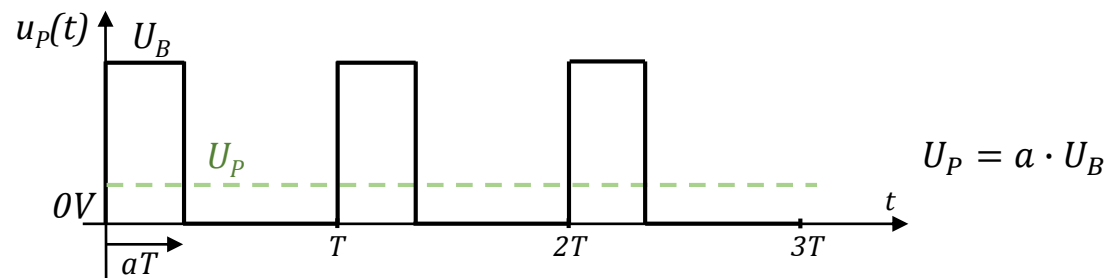
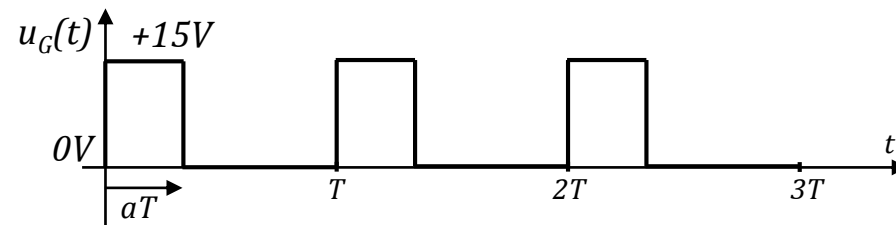
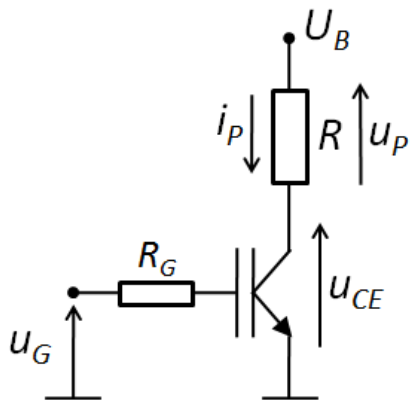
- **период прекидања - T**
- **фактор испуне - a .**

Циљ: Остварити потребну средњу вредност величине унутар периода прекидања T .

Начин: Применити расположиве дискретне вредности величине у одређеном односу трајања.

- *примери рада једноставних кола са транзисторима*

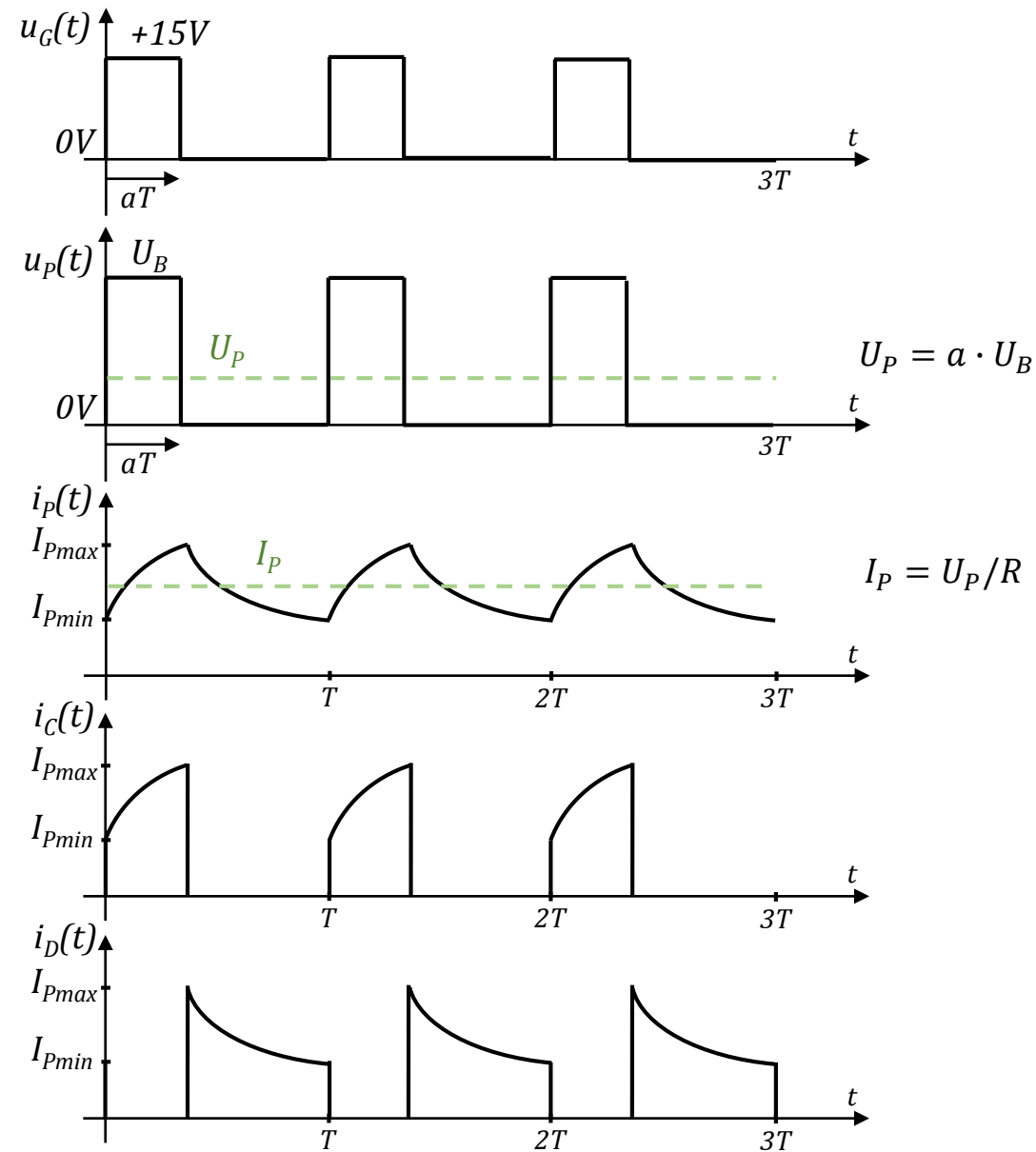
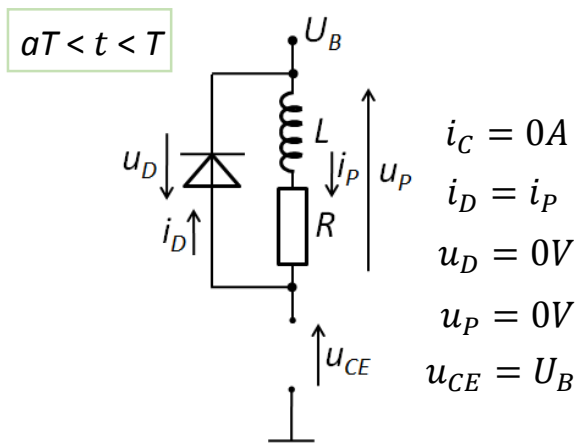
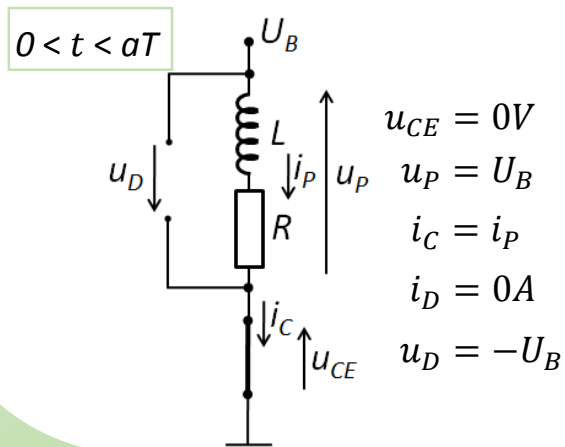
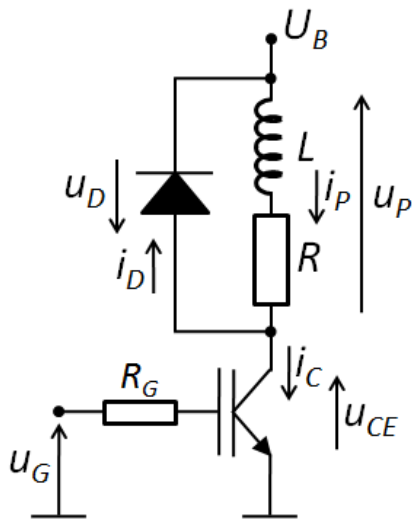
транзистор са отпорним оптерећењем:



$$U_P = \frac{1}{T} \int_0^T u_P \cdot dt = \frac{1}{T} U_B \cdot aT + 0 \cdot (1 - a) \cdot T = a \cdot U_B$$

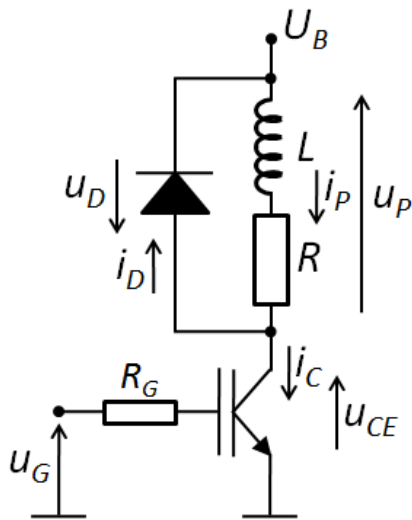
- *примери рада једноставних кола са транзисторима*

транзистор са отпорним оптерећењем:

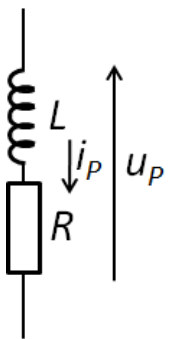


- *примери рада једноставних кола са транзисторима*

транзистор са отпорним оптерећењем:



RL елемент са константном побудом по периодима ($u_P = U_B$, $u_P = 0V$):



$$u_P = u_L + u_R = L \cdot \frac{di_P}{dt} + R \cdot i_P$$

Решење диференцијалне једначине 1. реда са константним улазом:

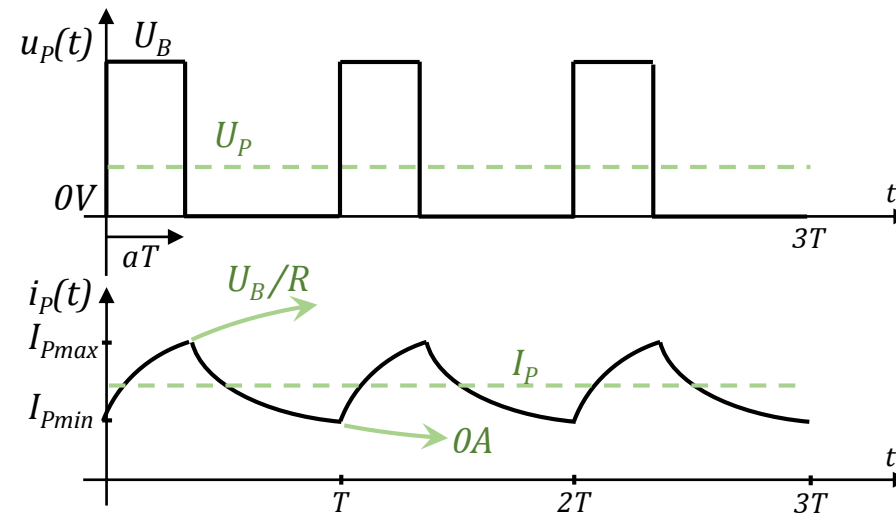
$$i_P(t) = I_{P\infty} + (I_{P0} - I_{P\infty}) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}$$

t_0 – почетни тренутак

$\tau = L/R$ – временска константа

I_{P0} – вредност i_P у t_0

$I_{P\infty}$ – вредност i_P у устаљеном стању, $t \nearrow \infty$



$$0 < t < aT \quad i_P(t) = \frac{U_B}{R} + (I_{Pmin} - \frac{U_B}{R}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$aT < t < T \quad i_P(t) = I_{Pmax} \cdot e^{-\frac{t-aT}{\tau}}$$

$I_P = ?$

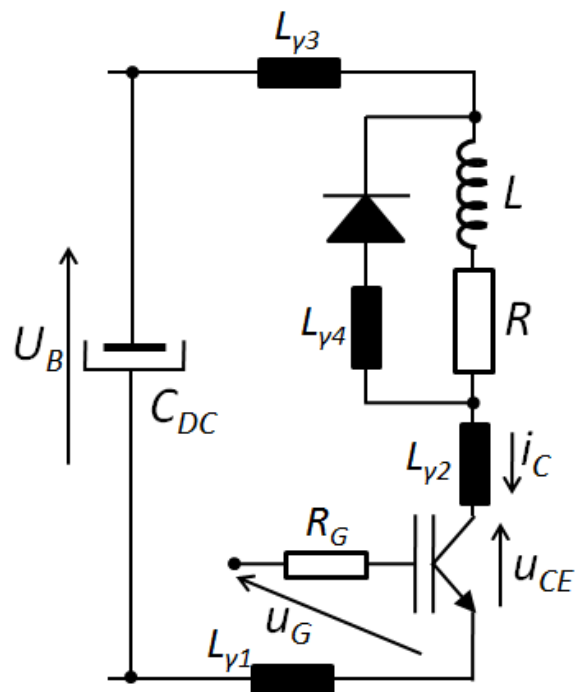
$$U_L = \frac{1}{T} \int_0^T u_L(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T L \frac{di_P}{dt} \cdot dt = \frac{L}{T} \int_{I_{Pmin}}^{I_{Pmax}} di_P = 0V$$

$$U_P = U_R + U_L = U_R = R \cdot I_P$$

$$\Rightarrow I_P = \frac{U_P}{R} = \frac{a \cdot U_B}{R}$$

- заштита транзистора

узрок пренапона – паразитне индуктивности:



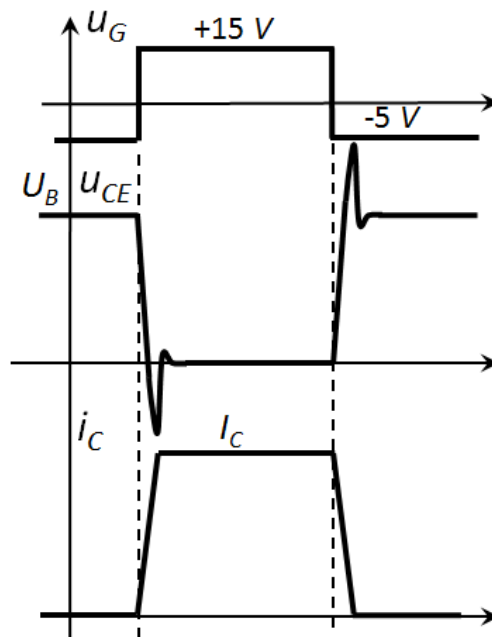
пренапон при искључењу транзистора:

$$u_{CE(L\gamma)} = -(L_{\gamma 1} + L_{\gamma 2} + L_{\gamma 3}) \cdot \frac{di_c}{dt}$$

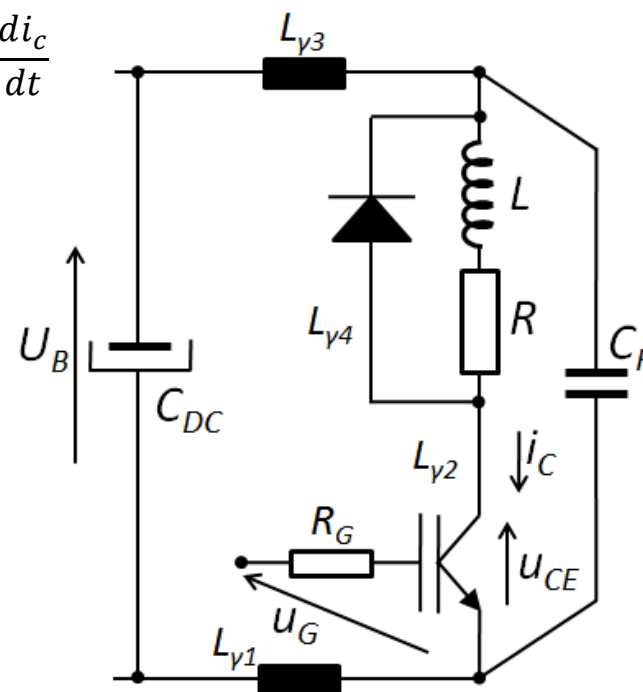
пренапон при укључењу транзистора:

$$u_{CE(L\gamma)} = -L_{\gamma 4} \cdot \frac{di_c}{dt}$$

За SiC MOSFET $di_c/dt=1A/ns$.
Индуктивност проводника дужине 1cm,
пречника 0,2mm² је 10nH.



заштита од пренапона:

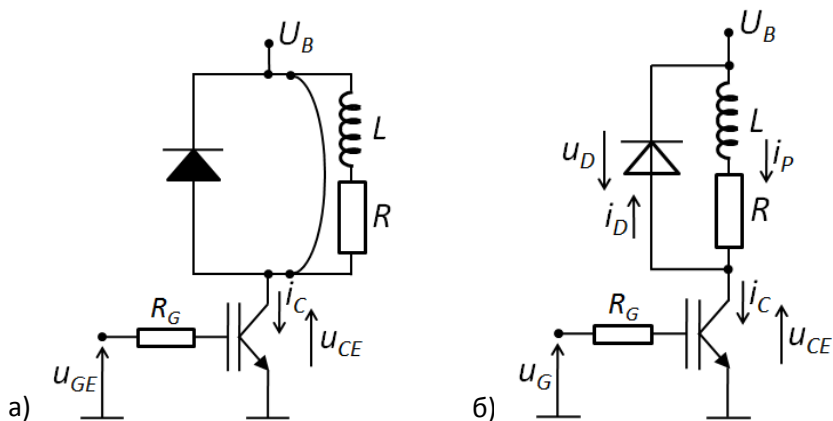


Блок кондензатор C_F ограничава di/dt кроз паразитне индуктивности линија напајања. Кратким и широким везама између транзистора, диоде и C_F се смањују паразитне индуктивности унутар прекидачког степена.

- заштита транзистора

заштита од кратког споја:

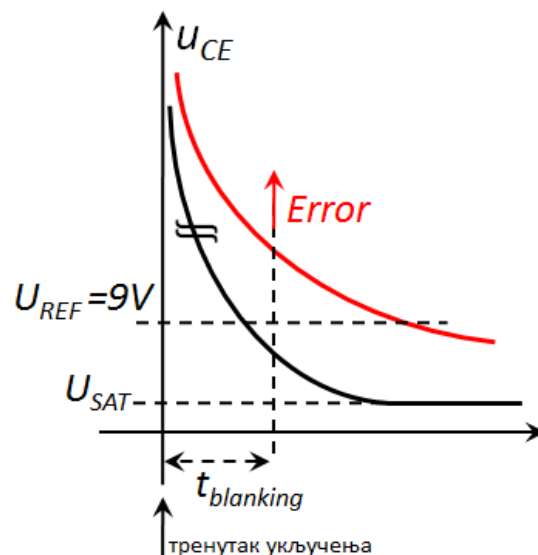
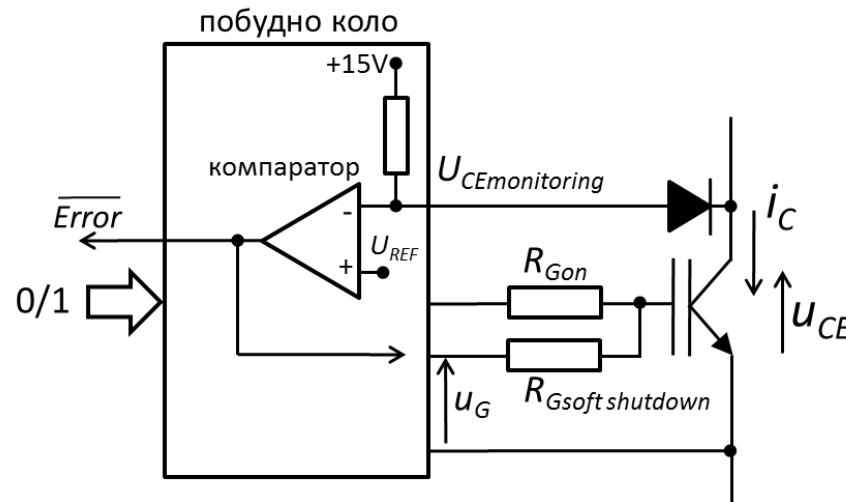
Кратак спој подразумева да укључењем транзистор кратко спаја крајеве напона напајања у колу. Узрок може бити спој између крајева потрошача (слика а.) или пробој друге полупроводничке прекидачке компоненте у колу (слика б.).



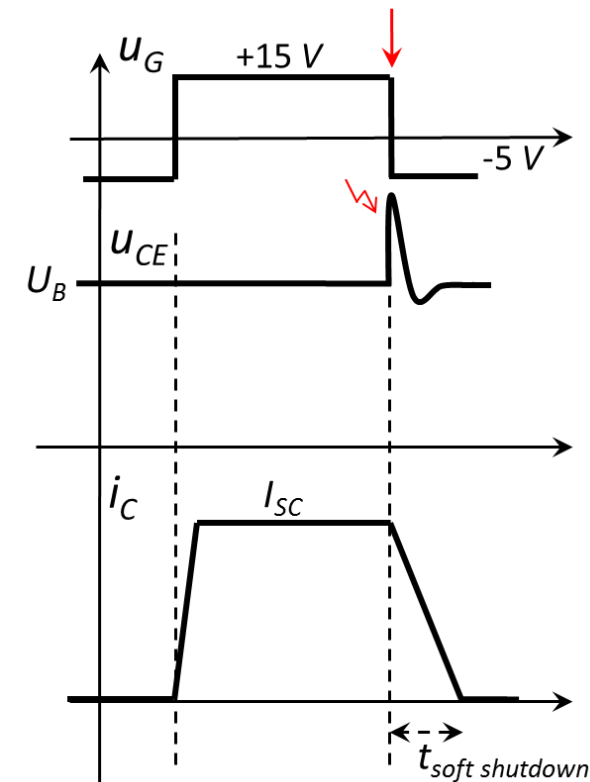
Кратак спој: транзистор остаје у активном режиму рада и струја i_C је ограничена производом транскондуктансе g_{FE} и напона U_G , приближно на $I_{SC} = 10 \times I_{CNOM}$. Транзистор се штити мерењем напона u_{CE} и препознавањем „десатурације“.

Blanking time, $t_{blanking}$, је време остављено транзистору да се сигурно укључи. Код IGBT-a оно износи око 2μs, а код MOSFET-a 200ns. Са друге стране, мора бити што краће могуће да при раду у кратком споју колу заштите од кратког споја стигне да искључи транзистора довољно брзо.

- препознавање изласка транзистора из засићења



- одзиви величина у колу



Након препознавања кратког споја, транзистор се мора довољно споро искључити да нагли пад струје великог интензитета не би произвео пренапон у u_{CE} и довео до напонског пробоја транзистора. Ово се решава искључењем помоћу веће отпорности у гејту, $R_{G_soft\ shutdown}$.