

2 ЕНЕРГЕТСКИ ЕЛЕКТРОНСКИ ЕЛЕМЕНТИ – ЕЛЕКТРОНСКИ ВЕНТИЛИ: ОСНОВНИ ПОИМИ

2.1 Увод

Од пронаоѓањето на тиристорот или т.н. силициумски полупроводнички насочувач (silicon-controlled rectifier - SCR) во 1957 година па до денес се појавил голем број на полупроводнички електронски енергетски елементи.

Класичниот тиристор и енергетската диода се главните полупроводнички елементи во енергетската електроника сè до почетокот на 1970-тите години, кога доаѓа до појава на повеќе нови комерцијално расположиви елементи. Денес употребуваните елементи главно можат да се поделат во пет основни групи:

1. *Енергетски диоди* - главно ги делиме на три вида: диоди за општа намена, брзи (високофреквенциски) диоди и т.н. Шотки-диоди (Shottky). Главна примена наоѓаат во насочувачките кола и во еднонасочните преобразувачи.

2. *Тиристори* - може да се поделат на 8 вида: тиристори за присилна комутација, тиристори за линиска комутација, тиристори со можност за исклучување со негативен импулс во гејтот (GTO), инверзно проводливи тиристори (RCT), статички индукционен тиристор (SITH), фототиристор, МОС-управувани тиристори (MCT), тиристори со можност за присилно исклучување (GATT - gate assisted turn-off thyristor). Зависно од видот наоѓаат различна примена во фазно-управуваните насочувачи (тиристори за линиска комутација), инвертори за моќност над 100 kW (GTO и MCT - вториве се мошне побрзи од првите), како регулатори на напонот во домаќинствата (двонасочниот тиристор за линиска комутација - тријак) итн.

3. *Енергетски биполарни транзистори (BJT)* - примена наоѓаат во колата со присилна комутација како што се еднонасочните преобразувачи. Во комбинација со диоди наоѓаат примена и во инверторите.

4. *Енергетски МОС-транзистори* - наоѓаат примена во еднонасочните преобразувачи и инверторите со импулсно-шибочинска модулација, особено кога се бара работа на повисоки фреквенции.

5. *Биполарни транзистори со изолиран гејт (IGBT) и статички индукциони транзистори (SIT)* - IGBT наоѓаат примена во инверторите за моќност од 1 kW до 100 kW, додека СИТ-овите се мошне погодни за високофреквенциски и апликации при голема моќност (на пример: аудио засилувачи, ВФ-засилувачи, микробранови засилувачи).

Некои од карактеристиките (максимални напон и струја, максимална работна фреквенција, време на исклучување и отпорност во проводна состојба) за дел од наброените елементи се прикажани во табелата 2.1, додека основните сим-

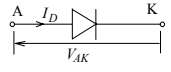
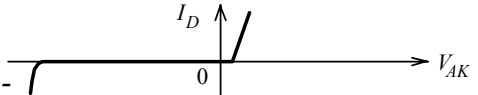
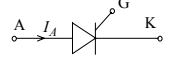
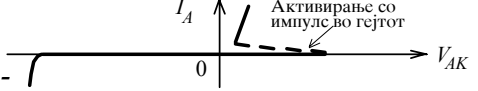
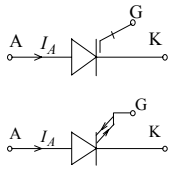

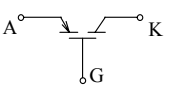
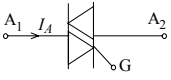
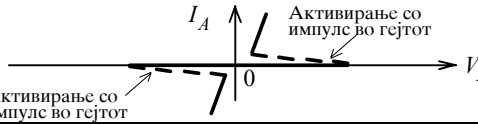
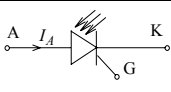
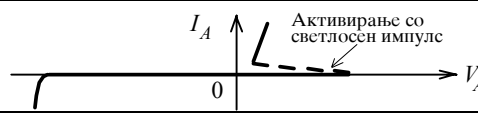
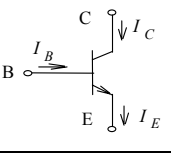
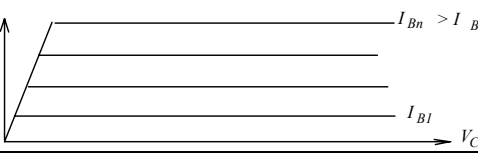
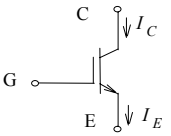
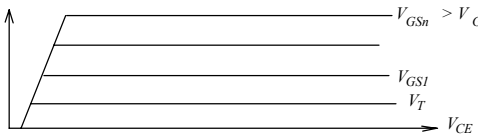
боли и приближните облици на струјно-напонските карактеристики се прикажани во табелата 2.2.

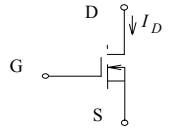
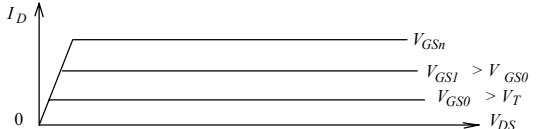
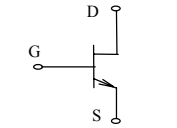
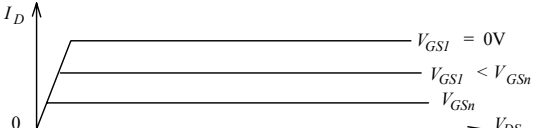
Табела 2.1 Карактеристики на некои енергетски електронски елементи

	Вид	Максимален напон/струја (V/A)	максимална фреквенција (kHz)	Време на исклучување (μ s)	Отпорност во проводна состојба (Ω)
диода	општа намена	10000/5000	1	100	0,16m
	високо-фреквенциска	3000/1000	10	2-5	1m
	Шотки	40/60	20	0,23	10m
тиристор	инверзно непроводлив	6000/5000	1	200	0,25m
	инверзно непроводлив	2500/400	5	40	2,16m
	високо-фреквенциски	1200/1500	10	20	0,47
	инверзно проводлив (RCT)	2500/1000	5	40	2,1m
	GATT	1200/400	20	8	2,24
	GTO	4500/3000	10	15	2,5m
	фототиристор	6000/1500	0,4	200-400	0,53
	SITH	4000/2200	20	6,5	5,75m
транзистор	тријак	1200/300	0,4	200-400	3,57
	единичен	400/250	20	9	4m
	единичен	400/40	20	6	31m
	единичен	630/50	25	1,7	15m
	дарлингтон	1200/400	10	30	10m
SIT		1200/300	100	0,55	1,2
мосфет		500/8,6	100	0,7	0,6
		1000/4,7	100	0,9	2
		500/50	100	0,6	0,4m
IGBT		1200/400	20	2,3	60m

MCT	600/60	20	2,2	18m
-----	--------	----	-----	-----

Табела 2.2 Символи и I - U карактеристики на некои електронски вентили

ЕЛЕМЕНТ	СИМБОЛ	КАРАКТЕРИСТИКА
диода		
тиристор		
SITH GTO		
MCT		
тријак		
фото-тиристор		
транзистор (NPN)		
IGBT		

мосфет N-канален		
SIT (во режим на ФЕТ)		

Енергетските електронски елементи се изработуваат како самостојни единици или како сложени единици - модули. Еден преобразувач често бара два, четири, шест или повеќе елементи во одредена конфигурација, зависно од неговата намена. Денес на пазарот можат да се најдат модули што содржат полумостна или мостна конфигурација, за еднофазен или трифазен систем на напојување, составени од различни видови на електронски вентили. Некои модули во себе ги содржат и елементите за заштита, како и колата за активирање на вентилите. Во поново време се појавуваат и т.н. *интелигентни модули*, кои ги интегрираат електронските вентили и **периферните** кола. **Периферните** кола можат да содржат влезна/излезна галванска изолација меѓу енергетскиот и управувачкиот дел, кола за управување, заштита и дијагностика, микрокомпјутерски систем за управување и сл. Корисникот, најчесто, кај ваквите модули, треба да обезбеди соодветно надворешно напојување и да го приклучи системот на мрежа.

Листа на некои светски производители на електронски енергетски елементи и модули е дадена во табелата 2.3.

Табела 2.3 Листа на некои од производителите на електронски енергетски елементи и модули

Advanced Power Technology
 Brown Boverly
 Eupec
 Fuji Electric/Collmer Semiconductor, Inc.
 Harris Corp.
 Hitachi Ltd.
 International Rectifier
 Marconi Electronic Devices, Inc.
 Mitsubishi Electric
 Motorola, Inc.
 National Semiconductors, Inc
 Nihon International Electronics Corp.
 Philips Semiconductors
 Power Integrations, Inc.
 Powerex, Inc.
 PowerTech, Inc
 RCA Corp.
 Semikron International

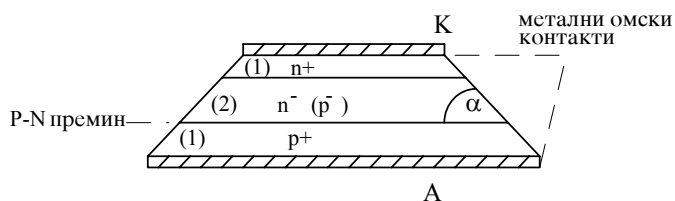
SGS-Thompson
 Siemens
 Siliconix, Inc.
 Tokin, Inc.
 Tokyo Denki
 Toshiba Corp.
 Unitrode Integrated Circuits
 Westcode Semiconductors Ltd.

2.2 Енергетски диоди

Енергетските полупроводнички диоди имаат значајна улога во енергетската електроника. Се употребуваат во електронските енергетски преобразувачи како прекинувачки елементи за извршување на различни функции. За најголем број апликации енергетските полупроводнички диоди може да се сметаат за идеални прекинувачи, но карактеристиките на реалните диоди се разликуваат од идеалните и имаат определени ограничувања.

За разлика од простата двослојна P-N структура, којашто не може истовремено да обезбеди и мал пад на напон во директна насока и голем инверзен пробивен напон, енергетската диода се состои од три слоја. Практично, со воведување на трет, слабо дозиран (готово беспримесен) слој, се постига мошне голем пробивен инверзен напон при што падот на напон во директната насока битно не се зголемува. Тоа се така-наречените PIN-диоди, познати и како Холмови диоди (според пронаоѓачот Hall, General Electric - 1952 година).

Внатрешната структура на енергетска диода е прикажана на сликата 2.1.



Слика 2.1 Внатрешна структура на монокристалот кај енергетска диода

- (1) подрачје со мала специфична отпорност
- (2) подрачје со голема специфична отпорност

Ваквите диоди се карактеризираат со: мал пад на напон во директната насока, голема дозволена густина на струјата во директната насока, мала инверзна струја на заситување и голем инверзен пробивен напон.

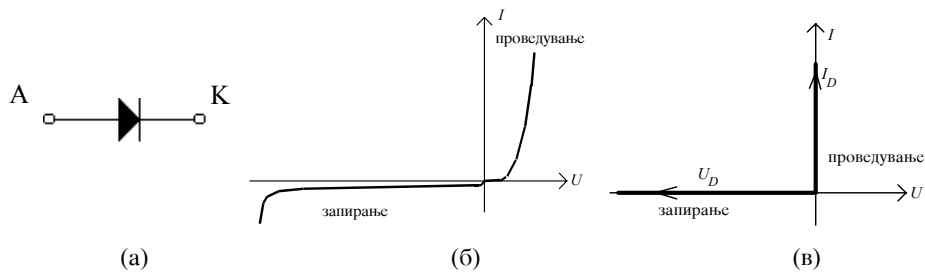
Наклонот на рабовите на силициумската плочка ја намалува јачината на електричното поле на рабовите (со закосувањето се зголемува растојанието меѓу точките со голема меѓусебна потенцијална разлика).

2.2.1 Статички карактеристики на енергетските диоди

Статичката карактеристика на диодата може да се опише со Шоклиевата равенка

$$I_D = I_S(e^{V_D/nV_T} - 1) \quad (2.1)$$

каде што е: I_D - струја низ диодата, А
 V_D - напон на диодата (анодата позитивна во однос на катодата), V
 I_S - инверзна струја на заситување на диодата, А
 n - коефициент на емисија (емпириски - со вредност меѓу 1 и 2)
 V_T - напонски еквивалент на температурата ($V_T = T/11605$ V)
 T - апсолутна температура, К



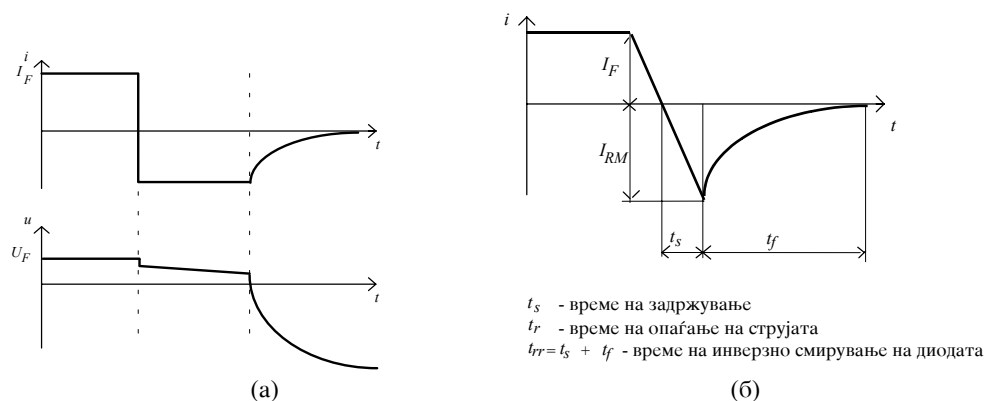
Слика 2.2 Диода а) симбол, б) карактеристика на реална диода, в) карактеристика на диода како идеален вентил

На сликата 2.2 се прикажани симболот на реална диода и струјно-напонските карактеристики на реална диода и диода како идеален прекинувач.

Карактеристиката на диодата (сл. 2.2-б) може да се подели на три области: област на директна поларизација - каде што диодата е проводна; област на инверзна поларизација (запирање) - каде што низ диодата тече мала струја (т.н. инверзна струја на заситување); и област на пробив - каде што при голем инверзен напон протекува и голема инверзна струја (работата во ова подрачје најчесто доведува до уништување на диодата). Во нормални услови, кога диодата работи како прекинувач, таа преминува од проводна состојба во состојба на запирање без да навлезе во областа на инверзен пробив. Во анализата на преобразувачите многу често диодата се разгледува како идеален прекинувач со карактеристика како на сликата 2.2-в).

2.2.2 Динамички карактеристики на енергетските диоди

Во уредите на енергетската електроника диодите имаат улога на прекинувачи и во својата работа постојано преминуваат од проводна во непроводна (процес на исклучување) и од непроводна во проводна состојба (процес на вклучување). Овие промени на состојбата не се моментални при што процесот на исклучување е покритичен и многу зависи од големината на струјата низ диодата како и од видот на потрошувачот.

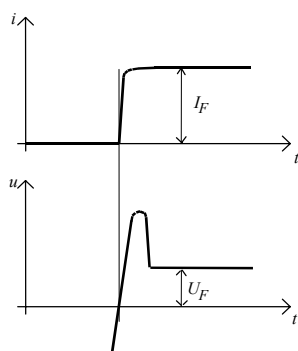


Слика 2.3 Исклучување на енергетска диода: а) при омско оптоварување; б) при индуктивно оптоварување

а) Исклучување

Временската зависност на напонот и струјата при исклучување на диода поврзана на омски потрошувач е прикажана на сликата 2.3-а, додека дијаграмот на промената на струјата при индуктивно оптоварување е прикажана на сликата 2.3-б. t_{rr} е покусо ако рекомбинацијата во централното подрачје е поинтензивна.

б) Вклучување



Временската зависност при вклучување на диодата е прикажана на сликата 2.4. Врвната вредност на падот на напон зависи од брзината на растот и од конечната вредност на струјата. Времетраењето на оваа динамичка појава е кусо во споредба со времето на исклучување.

Слика 2.4 Вклучување на енергетска диода

2.2.3 Видови енергетски диоди

Во однос на брзината на работа и напонската и струјната оптоварливост диодите може да се поделат на три вида: стандардни или диоди за општа намена, брзи (високофреквентни) диоди и т.н. Шотки-диоди (Shottky).

Диодите за општа намена (често наречени насочувачки диоди) се карактеризираат со релативно долго време на исклучување (25 μ s), со работни струи од 1 А до неколку илјади амperi, и со инверзен напон на пробив од 50 V до 10000 V.

Се применуваат за работа на ниски фреквенции (до 1 kHz) и особено кај мрежно-управуваните насочувачи. Се изработуваат главно со постапка на дифузија.

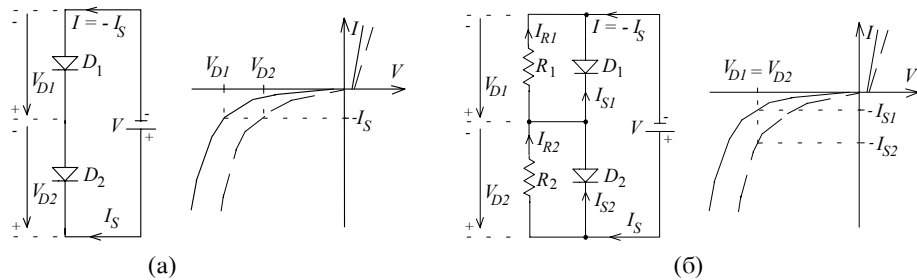
Високофреквенцискиите диоди (брзи, односно со кусо време на исклучување) имаат време на исклучување покусо од 5 μ s. Се користат кај инверторите и еднонасочните преобразувачи, каде што брзината на исклучување е често од критичен значај. Струјната и напонската оптоварливост им е помала од претходните (неколку стотици ампери и околу 3 kV). Можат да бидат од дифузен или епитаксијален тип.

Шојки-диодите се диоди кај кои што проблемот на акумулација на полнеж околу *P-N* преминот се надминува со употреба на контакт метал-полупроводник. Потенцијалната бариера на ваквиот контакт остварува насочувачка функција. Притоа се намалува падот на напон при проведување, а се зголемува брзината на работа. Напонската и струјна оптоварливост се движат во границите на 100 V и 300 A.

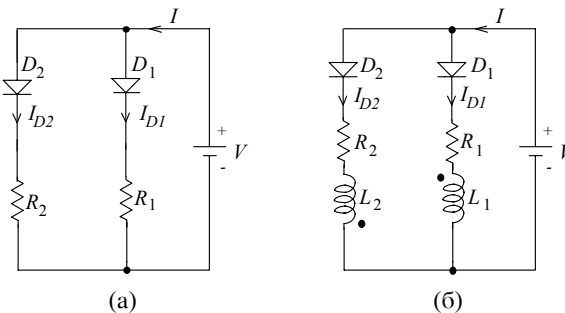
2.2.4 Сериско и паралелно поврзување на енергетските диоди

Серискиот поврзување на диодите се јавува како потреба кога една диода не може да го издржи инверзниот напон што се јавува во нормални работни услови. Поради различни инверзни струи на заситување распределбата на инверзниот напон нема да биде подеднаква на сите диоди, па како резултат на тоа може да се случи диодата со помала инверзна струја да држи поголем напон од нејзиниот напон на пробив. Тоа ќе резултира во пробив на диодата, што од своја страна повлекува пробив и на другата диода со можни катастрофални последици по уредот во целина. За да се обезбеди правилна распределба на напоните вообичаено е паралелно на диодите да се додадат елементи (отпорници, зенер-диоди, RC комбинации и сл.). На сликата 2.5-а се прикажани две сериски поврзани диоди во услови на инверзна поларизација и нивните струјно напонски карактеристики. На сликата 2.5-б се прикажани истите диоди со дополнителни отпорници за изедначување на напоните и нивниот ефект врз распределбата на напоните.

Паралелниот поврзување пак, е потребно кога една диода не може да ја издржи потребната струја. Сега, во услови на директна поларизација, напонот на диодите ќе биде ист но распределбата на струите ќе зависи од $I-U$ карактеристиките на секоја од нив. Тоа ќе предизвика различно загревање и уште поголема разлика во струите. Процесот е кумулативен и лесно може да доведе до прегорување на едната (по оптоварената) диода, а потоа и на другата. Две можни решенија, за изедначување на струите во статички и динамички услови се прикажани на сликите 2.6- (а и б).



Слика 2.5 Сериска работа на диоди а) без елементи за изедначување на напоните, б) со отпорници за изедначување на напоните.



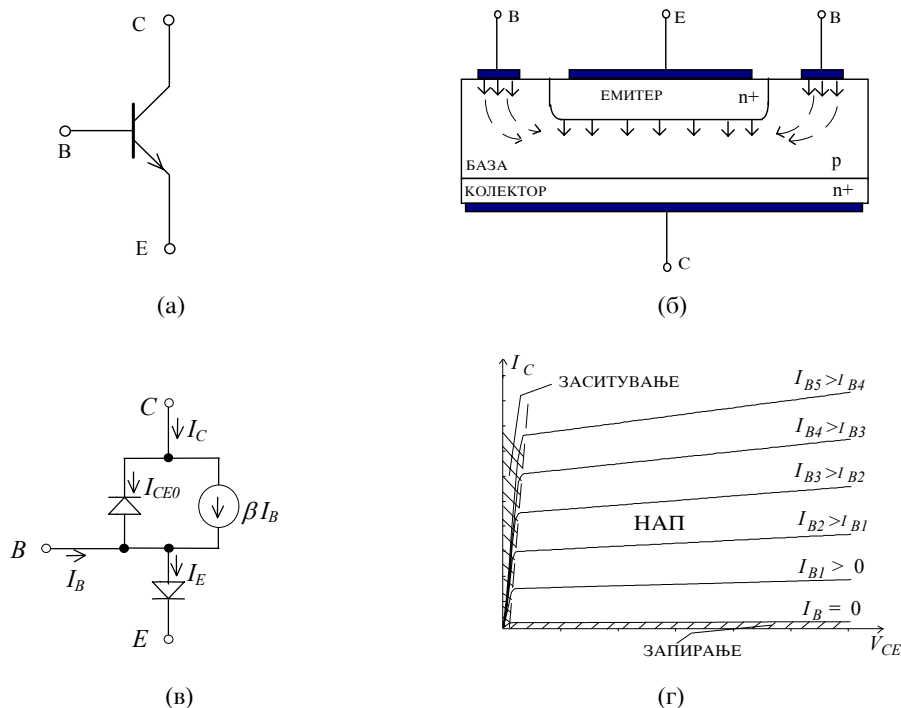
Слика 2.6 Паралелна работа на диоди а) распределба на струите во статички услови, б) распределба на струите во динамички услови

2.3 Енергетски транзистори

Транзисторот, по својата конструкција, е посложен елемент од диодата. Во основа тој претставува трислојна структура и има три приклучоци, од кои едниот претставува влез за управувачкиот сигнал. Зависно од распоредот на полупроводничките слоеви разликуваме два вида биполарни транзистори: *NPN* и *PNP*. Во енергетската електроника главно се употребуваат транзисторите од *NPN*-видот, пред сè, поради предностите што прилегуваат од тоа што главните носители на електричен полнеж се електроните.

2.3.1 Основни својства на биполарните транзистори

На сликата 2.7 се прикажани симболот, структурата, еквивалентниот модел за голем сигнал и излезните карактеристики на биполарен транзистор во спој со заеднички емитер, со назначени подрачја на работа. Имено, кај биполарните транзистори, се разликуваат четири работни подрачја дефинирани со поларизацијата на емитерскиот и колекторскиот *P-N* премин. Тоа се: нормално активно подрачје - *НАП* (емитерскиот премин е директно поларизиран а колекторскиот инверзно), запирање (обата *P-N* премини се инверзно поларизирани), заситување (обата *P-N* премини се директно поларизирани) и инверзно активно подрачје (емитерскиот премин е инверзно поларизиран а колекторскиот директно).



Слика 2.7 Биполарен *NPN* транзистор: а) симбол, б) структура, в) еквивалентен модел за голем сигнал, г) излезни карактеристики со назначени работни подрачја

Поаѓајќи од сликата 2.7-в, може да се напише:

$$I_E = I_C + I_B \quad (2.2)$$

Бидејќи за спојот со заеднички емитер базната струја е влезна, додека колекторската струја е излезна, за нормалното активно подрачје ќе важи:

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} \quad (2.3)$$

каде што $\beta = h_{FE}$ е факторот на струјното засилување за конфигурација со заеднички емитер, а I_{CE0} е инверзната струја на заситување за патеката колектор-емитер.

За конфигурацијата со заедничка база ќе важи изразот:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} \quad (2.4)$$

Тука $\alpha = h_{FB}$ е факторот на струјното засилување за конфигурација со заедничка база, а I_{CB0} е инверзната струја на заситување за преминот колектор-база.

Исто така треба да се знае дека врската меѓу α и β е: $\alpha = \beta/(\beta+1)$, односно $\beta = \alpha/(1-\alpha)$.

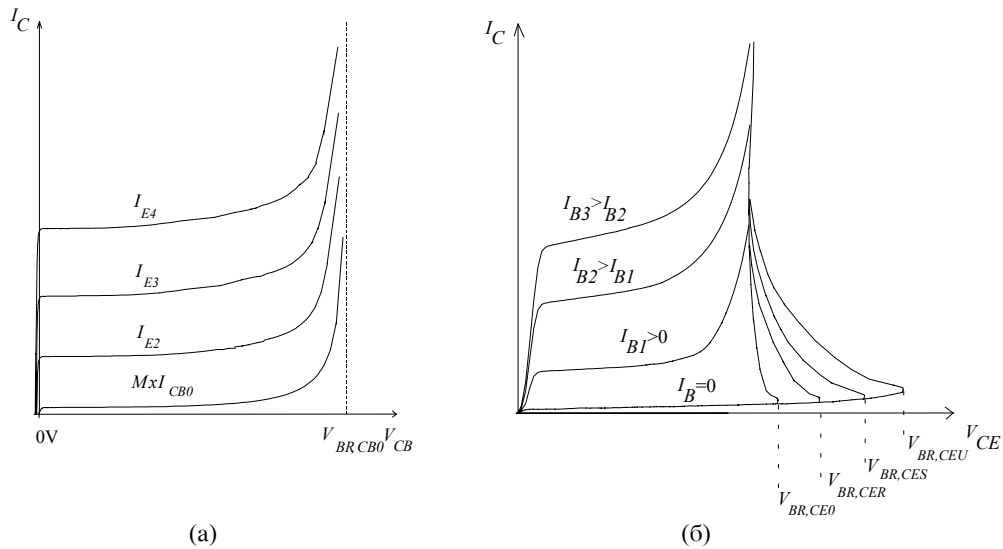
2.3.2 Карактеристики на енергетските транзистори

Основната теорија на енергетските транзистори не се разликува од основната теорија на кој било биполарен транзистор. Енергетскиот транзистор се одликува со голема напонска (јаки електрични полиња) и голема струјна (големи густини на струјата) оптоварливост. Затоа, основната теорија на енергетските транзистори треба да се дополни со ефектите од јаки електрични полиња и големи густини на струјата.

Основната физичка теорија на транзисторот треба да се прошири, освен со топлотните (создавање и одведување на загубите) и напонските (пробивен напон) ефекти, и со појавите во врска со: модулацијата на проводливоста на базата, концентрацијата на струјата во емитерот, проширување на ефективната ширина на базата и секундарниот пробив.

Иако постојат три основни конфигурации на поврзување на биполарните транзистори, во енергетската електроника во улога на вентили најчесто се употребуваат *NPN* транзистори во спој со заеднички емитер. Напонот на транзисторот е минимален во заситување, а струјата е минимална во запирање. Притоа, до пробив на колекторскиот *P-N* премин може да дојде, освен во запирањето и во нормалното активно подрачје. Треба да се истакне дека кај сите полупроводнички компоненти доаѓа до трајна промена на карактеристиките (па и до уништување) ако дојде до пречекорување на напонските и температурните граници. Како критични гранични величини се сметаат: граничните напони, граничните струи, граничните температури (на пример минимална и максимална температура), граничните загуби. Кај силициумските транзистори во спој со заеднички емитер, често се јавува подрачје со негативна отпорност околу пробивното подрачје (сл. 2.8-б). Причина за тоа е промената на факторот на струјното засилување h_{FE} зависно од струјата. За мали струи h_{FE} е мало и расте со пораст на струјата. Со тоа, за поголема вредност на струјата h_{FE} ќе биде поголемо

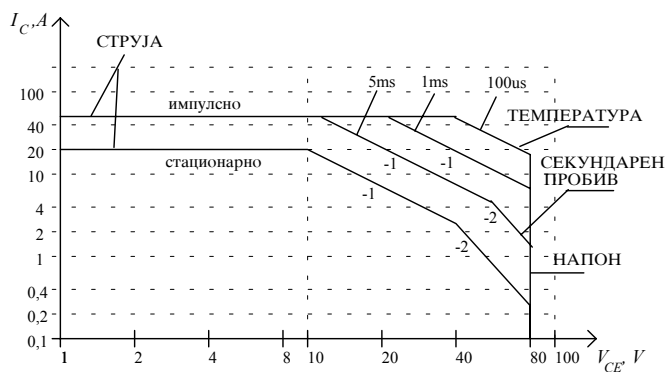
па, за поддржување на пробивот, потребен е помал напон. Притоа, напонот на пробив ќе зависи од состојбата на базниот приклучок.



Слика 2.8 Излезни карактеристики на транзистор во близината на напонот на пробив за конфигурација: а) со заедничка база б) заеднички емитер

2.3.3 Оптоварливост на транзисторот во активното подрачје

На сликата 2.9 се прикажани ограничувањата во активното подрачје на



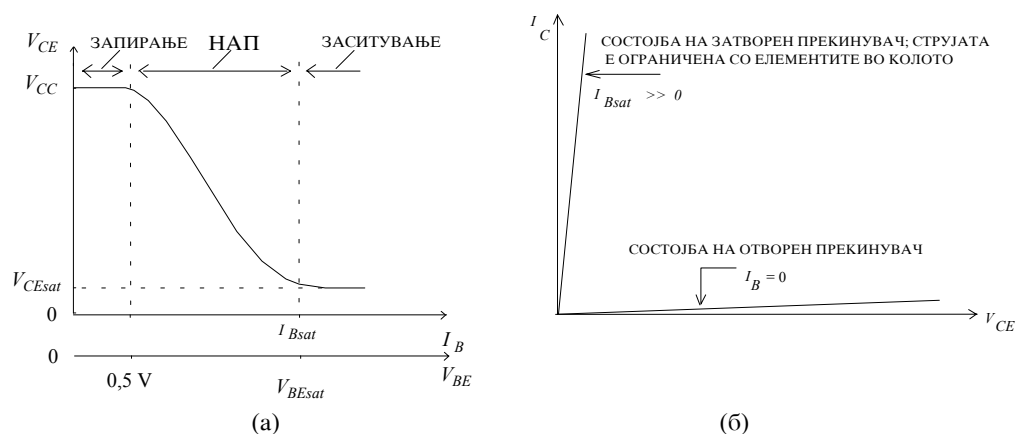
Слика 2.9 Област на сигурна работа (SOA) на транзисторот во активното подрачје

транзисторот. Разликуваме: *ограничување поради гранична струја* (различно при импулсно или статичко оптоварување); *ограничување поради виртуелна температура* (хипербола на гранични загуби – наклон -1); *ограничување поради секундарен пробив* (наклон -2; секундарниот пробив започнува во подрачје на релативно високи загуби и со извесно доцнење по достигнувањето на критичните загуби);

о̀граничување од напон. Покрај тоа транзисторот не издржува големи инверзни напони.

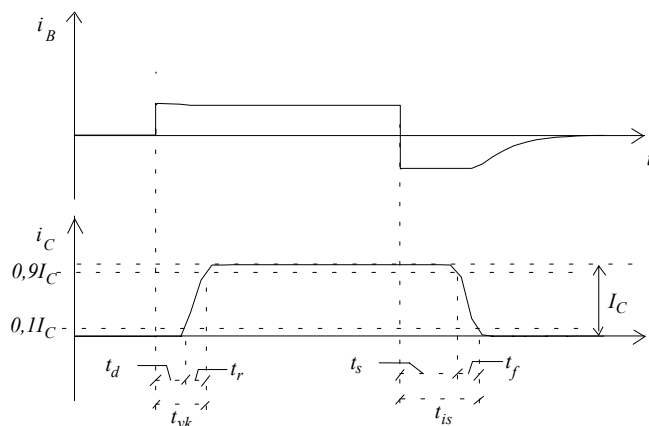
2.3.4 Работа на биполарен транзистор како прекинувач

Кога транзисторот работи како вентил (прекинувачки режим) тој се префрла од состојба на запирање во состојба на заситување и обратно, минувајќи притоа низ нормалното активно подрачје. Преносната карактеристика е прикажана на сликата 2.10-а, а струјно-напонската карактеристика за двете соодветни состојби на сликата 2.10-б. За одржување на состојбата на заситување (затворен прекинувач) со колото за управување мора непрекинато да се обезбеди базната струја да има поголема вредност од $I_{Bsat} = I_{Cmax}/\beta$. (I_{Cmax} е максималната струја што може да протече низ транзисторот кога тој е во заситување. Оваа струја зависи од надворешните елементи во колекторската и емитерската гранка.)



Слика 2.10 Транзистор како прекинувач: а) преносна карактеристика, б) $I-U$ карактеристика за отворен и затворен прекинувач

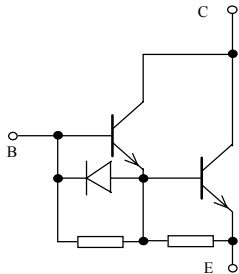
Процесот на префрлање меѓу состојбите не е моментален (слика 2.11).



Слика 2.11 Дефиниција на времето на пораст на колекторската струја и времето на нејзиното опаѓање кај биполарен транзистор во импулсен режим на работа

Времето на вклучување на транзисторот t_{vk} се состои од две компоненти: време на доцнење t_d и време на пораст на колекторската струја t_r . При исклучување потребно е најнапред да се извлече акумулираниот полнеж од базата (време на задржување t_s), а потоа колекторската струја опаѓа кон нулата (t_f).

2.3.5 Транзистори во Дарлингтонова конфигурација



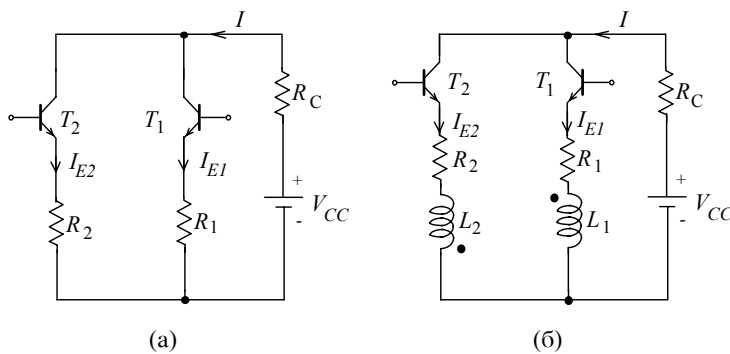
Слика 2.12 Дарлингтонова конфигурација на енергетски транзистор

Струјното засилување кај енергетските транзистори е релативно мало. За зголемување на факторот β , често се користи помошен транзистор со што се добива т.н. Дарлингтонова конфигурација (слика 2.12). Овие транзистори имаат влошени динамички карактеристики, што резултира во подолго време на вклучување и исклучување. Целата структура се изведува како една интегрална компонента.

2.3.6 Сериска и паралелна работа на транзистори

За зголемување на напонската издржливост транзисторите можат да се поврзуваат во серија. Управувањето мора да се извршува едновременно. Битно е сите карактеристики на обата транзистора да бидат еднакви (β , праг на проведување, напон на проводна состојба, време на вклучување и исклучување). Дури и карактеристиките на управувачките кола треба да бидат еднакви. Може да се применат и кола за распределба на напоните (слични како кај диодите).

За зголемување на работната струја во колото, транзисторите можат да се поврзуваат паралелно. И тука е битно сите карактеристики да им бидат еднакви со што ќе се обезбеди еднаква распределба на струите. Во практика, пред сè поради негативниот температурен коефициент на транзисторот во проводна состојба, се користат помошни структури за порамномерна распределба на струите (сл. 2.13).



Слика 2.13 Паралелна работа на транзистори а) распределба на струите во статички услови, б) распределба на струите во динамички услови