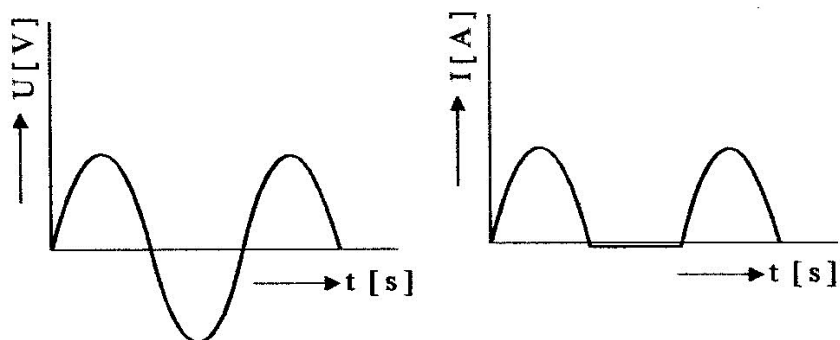


## 10 Fyzikálne javy v polovodičoch a polovodičové prvky

### 10.1 Elektrické javy

**Diódový jav:** usmerňujúci jav, ktorý vzniká na PN priechode, ak je naň pripojené striedavé napätie, je znázornený na obr. 10.1.

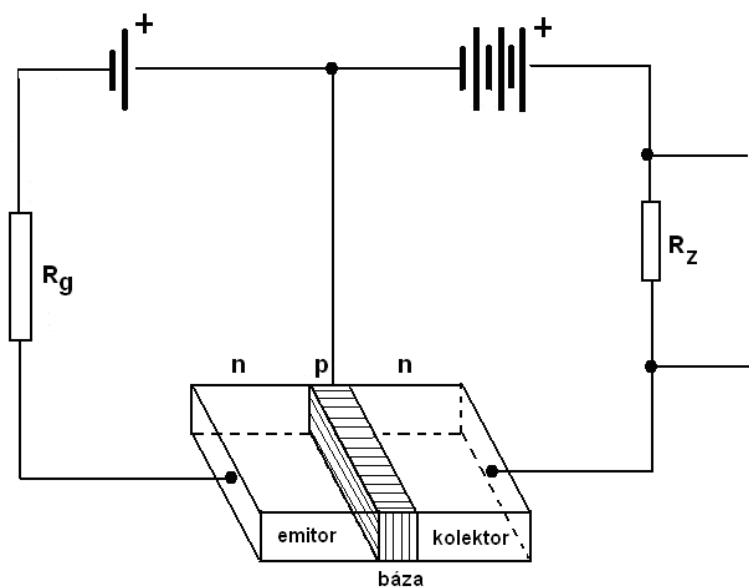


Obr. 10.1 Diódový (usmerňovací) jav na PN priechode

Podstata javu vyplýva z V-A charakteristiky PN priechodu, pretože jedna polovlna striedavého napätia je na PN priechode polarizovaná v smere priepustnom, druhá polovlna v smere závernom. Polovlny striedavého napätia, ktoré sú na PN priechode polarizované v priepustnom smere, PN priechod prepúšťa, opačné polovlny PN priechod prakticky neprepúšťa. Diódový jav vzniká za určitých podmienok aj na styku polovodiča s kovom.

**Tranzistorový jav:** je zosilňovací jav, ktorý vzniká v polovodičoch za vhodných podmienok (obr. 10.2). Súčiastky, v ktorých sa zosilnenie dosahuje, nazývame tranzistory. Existuje mnoho typov tranzistorov:

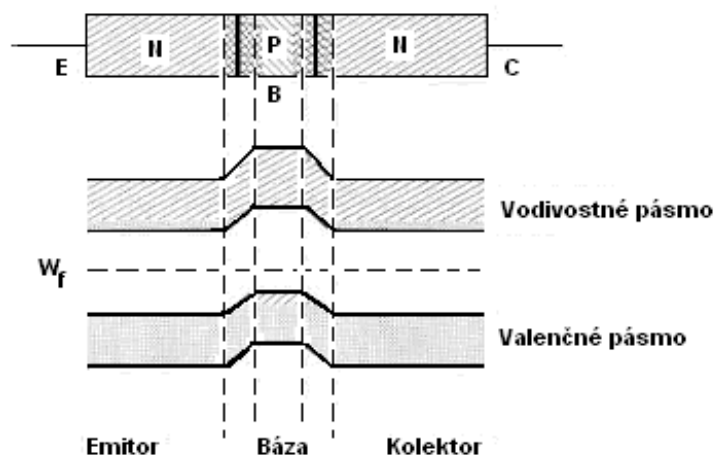
- bipolárne** (pre svoju činnosť využívajú obidva druhy voľných nosičov náboja: majoritné a minoritné nosiče),
- unipolárne** (pracujú iba na princípe ovplyvňovania majoritných nosičov náboja).



Obr. 10.2 Tranzistorový jav na PN priechode

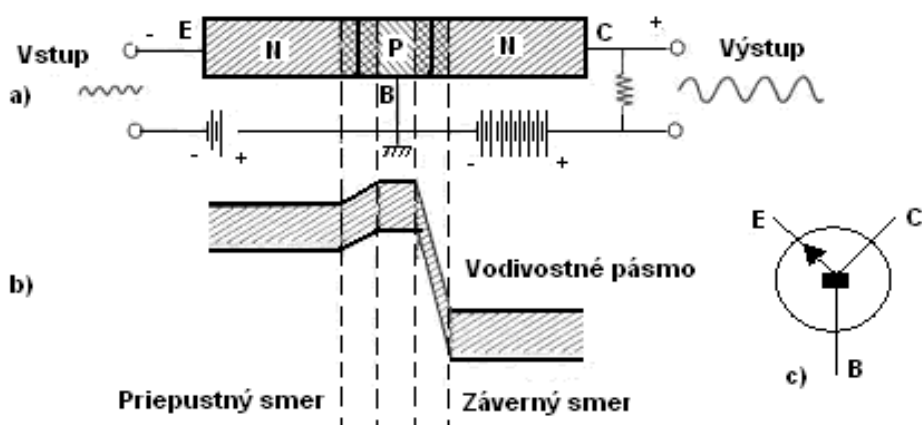
Plošný bipolárny tranzistor pozostáva z **dvoch PN priechodov**, ktoré sa musia vyhotoviť v jednom monokryštalicom polovodiči (PNP, NPN). Jeden PN priechod sa zapája v smere priepustnom (**emitor**), druhý v smere závernom (**kolektor**). Stredná časť medzi

priechodmi je **báza** tranzistora. Podstata zosilnenia spočíva v tom, že majoritné nosiče náboja, ktoré sú do bázy vstrekované malým emitorovým napätím (rádovo desatiny voltu), sa v báze stávajú minoritnými nosičmi a pohybujú sa ku kolektoru prevažne difúziou. Tieto nosiče náboja ľahko prechádzajú cez kolektorový priechod, na ktorom je pripojené napätie asi 100 krát väčšie, ako je napätie na emitorovom priechode. Keďže elektrický odpor PN priechodu zapojeného v závernom smere je podstatne väčší, ako je elektrický odpor PN priechodu zapojeného v priepustnom smere, môže byť zaťažovací odpor  $R_z$  v kolektorovom obvode podstatne väčší, ako je odpor v emitorovom obvode  $R_g$  (obr. 10.2). Schematický pásmový diagram nepripojeného tranzistora je na obr. 10.3. Na obr. 10.4 je zapojenie NPN tranzistora.



Obr. 10.3 Schematický pásmový diagram nepripojeného tranzistora

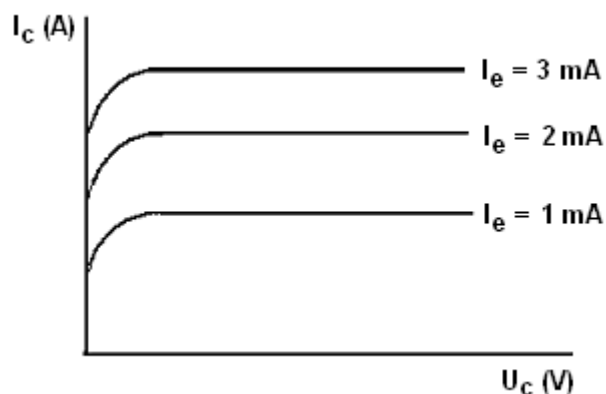
Dva priechody PN sú v takej tesnej blízkosti, že nosiče náboja jedného, polarizovaného v priamom smere ovplyvňujú závernú schopnosť druhého, polarizovaného v spätnom smere. Veľké napätové zosilnenie na zaťažovacom odpore  $R_z$  sa dosiahne vtedy, ak väčšina nosičov, ktoré vstrekol emitor do bázy, sa dostane ku kolektoru a prejde kolektorovým obvodom.



Obr. 10.4 a) Zapojenie NPN tranzistora, b) Schematický pásmový diagram zapojeného NPN tranzistora, c) Symbol používaný pre NPN tranzistor

Stredná spoločná vrstva, báza, musí byť dostatočne tenká, aby nosiče náboja vstrekované emitorovým priechodom, ktoré sú v báze minoritnými, nerekombinovali skôr, než dosiahnu kolektorový priechod. Hrúbka bázy je porovnateľná s difúznou vzdialenosťou minoritných nosičov náboja, pri čo najmenšom množstve porúch kryštálovej mriežky

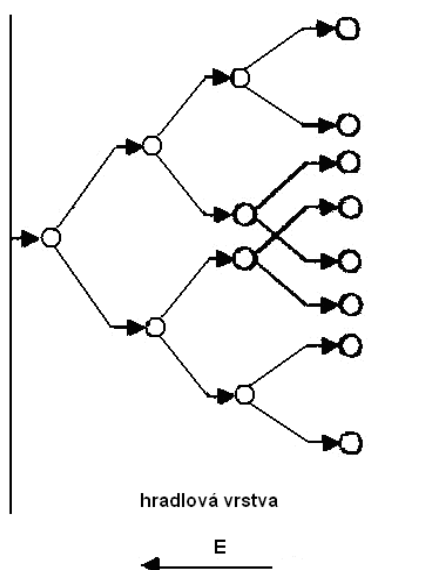
(poruchy kryštálovej mriežky skracujú dobu života minoritných nosičov náboja). Ak sa tranzistor používa pre zosilnenie signálu, „dióda“ pozostávajúca z emitora a bázy je zapojená v priepustnom smere, zatiaľ čo báza – kolektor „dióda“ je zapojená v závernom smere. Elektróny vstrekané z emitora do bázy musia mať dostatočnú energiu, aby boli schopné sa „šplhať“ cez bariéru, ktorou je báza. Elektróny prechádzajú difúziou cez bázu až kým sa dosiahne vyprázdnenie zóny medzi bázou a kolektorom. Tu sú elektróny urýchľované v silnom elektrickom poli kolektorového obvodu. Zrýchlenie elektrónov spôsobuje zosilnenie vstupného striedavého signálu. Na obr. 10.5 je VA charakteristika tranzistora.



Obr. 10.5 VA charakteristika (kolektorová) tranzistora

Určitým typom tranzistorového javu je **Earlyho jav**: je zmena šírky bázy bipolárneho plošného tranzistora pri zmene kolektorového napätia, ktoré mení šírku oblasti priestorového náboja kolektorového priechodu.

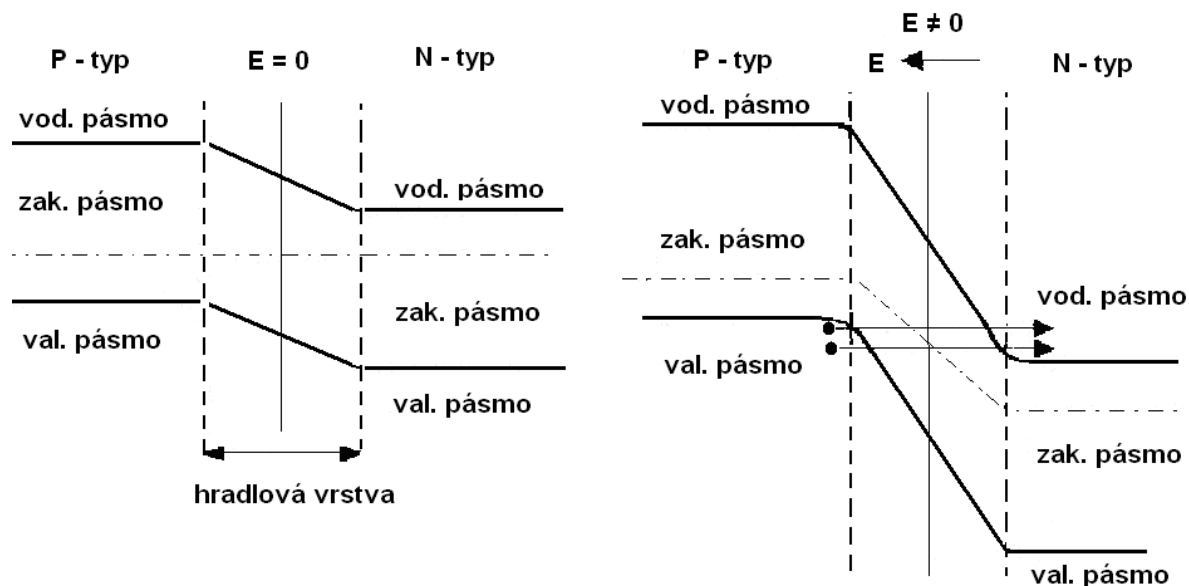
**Lavínový jav**: je generácia párov voľných nosičov náboja elektrónov a dier lavínovou **nárazovou ionizáciou** (obr. 10.6) neutrálnych atómov polovodiča napríklad pôsobením silného elektrického poľa na záverne polarizovaný priechod PN s následným lavínovým prerazom po prekročení kritického napätia. Využíva sa v Zenerových diódach, ktoré pracujú v závernom smere. Tieto diódy sa v praxi využívajú na stabilizáciu napätia. Podmienkou lavínového javu je dostatočne hrubá hradlová vrstva.



Obr. 10.6 Nárazová ionizácia v hradlovej vrstve PN priechodu

**Zenerov jav (tunelový preraz)**: je uvoľňovanie elektrónov z väzieb kryštálovej mriežky silným elektrickým poľom (obr. 10.7). Využíva sa v Zenerových diódach, ktoré majú tenkú

hradlovú vrstvu, v ktorej sa pri pomerne malom napätí dosiahne veľmi silné elektrické pole. Zenerov jav sa uskutočňuje tunelovaním elektrónov. Aby jav na priechode PN nastal je nutné vyrovnanie valenčného pásu polovodiča P s vodivostným pásom polovodiča N, pričom oblasť potenciálovej bariéry musí byť zúžená. Jav využívajú tunelové (Esakiho) diódy, s vysokou koncentráciou prímiesí. Energetická pásmová schéma elektrónov PN priechodu pri nulovom a pri nenulovom vonkajšom napätí.



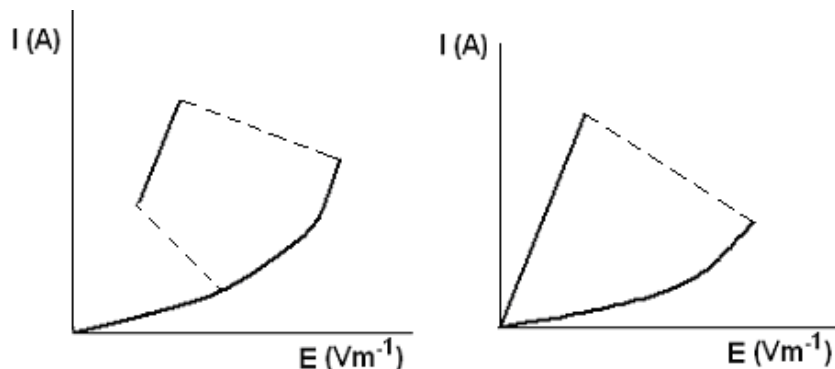
Obr. 10.7 Energetická pásmová schéma elektrónov PN priechodu  
a) pri nulovom a pri b) nenulovom vonkajšom napätí

V závernom smere vzrastie napätie nad kritickú hodnotu, elektróny sú uvoľňované z väzieb medzi atómami kryštálovej mriežky silným elektrickým poľom. Tento efekt sa využíva v obvode na udržanie napätia na konštantnej úrovni. Zenerove diódy sa vo všeobecnosti nezničia prierazným napätím, ale veľkým teplom v súčiastke (cca  $T_{tav}$ ).

**Tyristorový jav:** vzniká spojením dvoch tranzistorových javov v štvorvrstvovej štruktúre. Je podmienený existenciou závislosti prúdového zosilňovacieho činiteľa plošného tranzistora na prúde emitora a kolektorovom napätí.

**Prepínací jav:** uplatňuje sa najmä v sklovitých polovodičoch (obr. 10.8). Spočíva v tom, že pri určitej intenzite elektrického poľa sklovitý polovodič skokom zvýši elektrickú vodivosť o 4 až 6 rádov oproti hodnote, ktorú mal pod touto intenzitou elektrického poľa. Následným znížením intenzity elektrického poľa si polovodič zachováva zvýšenú elektrickú vodivosť v určitej oblasti intenzity elektrického poľa, pričom po jej ďalšom znižovaní sa znova „prepne“ do pôvodného vysokoodporového stavu.

**Pamäťový jav:** je typický pre sklovité polovodiče (obr. 10.8). Spočíva v tom, že sa polovodič pri určitej kritickej intenzite elektrického poľa „prepne“ z vysokoodporového do nízkooporového stavu. Tento nízkooporový stav si polovodič zachováva aj pri nízkych intenzitách elektrického poľa. Nastáva v úzkom kanáliku, v ktorom nastane fázový priechod do kryštalického stavu pri pretekaní elektrického prúdu.



Obr. 10.8 Prepínací a pamäťový jav

## 10. 2 Termoelektrické javy

**Peltierov** - pohlcovanie alebo vyžarovanie tepla na priechode dvoch rozdielnych polovodičov alebo polovodiča a kovu pretekajúcim prúdom. Podstata toho javu vyplýva z existencie elektrónov s rozličnými energiami v stýkajúcich sa materiáloch a ich transporte zapríčinenom vonkajším elektrickým poľom. Ak elektróny prechádzajú z materiálu, v ktorom je ich energia vyššia, do materiálu, kde má nižšiu energiu, prebytočnú energiu odovzdávajú okoliu a kontakt sa otepluje. Pri opačnom smere pohybu sa elektróny dopĺňujú energetický rozdiel tým, že odčerpávajú energiu z okolia, čo má za následok ochladzovanie kontaktu. Peltierov jav sa najčastejšie využíva pri realizácii polovodičových chladiacich článkov.

**Seebeckov jav** – vznik termoelektrického napätia v látke, pozdĺž ktorej existuje teplotný gradient.

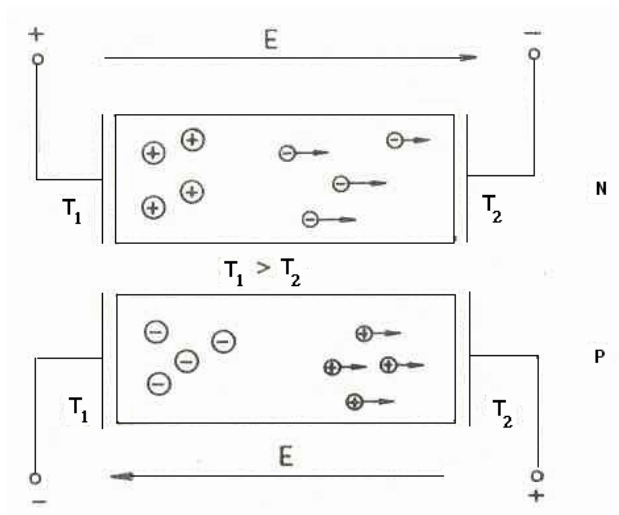
Termoelektrické napätie je dané súčtom kontaktného a objemového napätia. Kontaktné napätie vzniká pri styku dvoch látok ako rozdiel ich kontaktných potenciálov, ktorý sa vytvoril na základe rozličných teplôt kontaktov (v kovoch i v polovodičoch prakticky rovnaké), t.j. vzniká v dôsledku teplotnej závislosti kontaktných potenciálov stýkajúcich sa materiálov. Objemové napätie vzniká preniknutím (v dôsledku difúzie) voľných nábojov z oblasti s vyššou teplotou do oblasti s nižšou teplotou. V polovodičoch je difúzia voľných nosičov náboja následkom teplotného gradientu podstatne intenzívnejšia ako v kovoch, a to pre silnejšiu teplotnú závislosť koncentrácie a energie voľných nosičov náboja. Elektrická rovnováha týchto oblastí sa porušuje a vytvára sa potenciálny rozdiel, ktorý úplne prekazí ďalšie prenikanie.

Termoelektrické napätie pripadajúce na jednotkový rozdiel teploty sa nazýva Seebeckov koeficient  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{U_{\alpha}}{T_2 - T_1} \quad (10.1)$$

kde  $U_{\alpha}$  je termoelektrické napätie (V),  $T_2$  je teplota teplejšieho miesta ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_1$  – teplota chladnejšieho miesta ( $^{\circ}\text{C}$ )

Termoelektrický jav (obr. 10.9) je spôsobený závislosťou stykového potenciálu (polo)vodiča od teploty. Napríklad v polovodiči typu N sa teplom generované väčšinové nosiče pohybujú od teplého konca k studenému, čím na ňom vzniká záporný náboj. Spojením polovodičov P a N sa výsledné elektromotorické napätie zvýši. Používa sa najmä na meranie teplôt (termoelektrické články), k zisťovaniu typu polovodiča a na priamu premenu tepelnej energie na elektrickú (termoelektrické generátory).



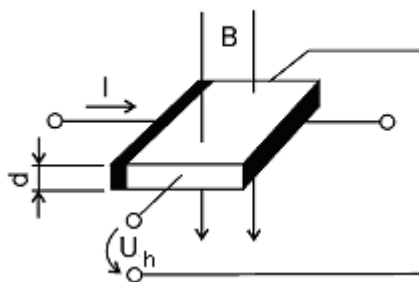
Obr. 10.9 Vznik termoelektrického napätia v polovodičoch (Seebeckov termoelektrický jav)

**Thomsonov jav:** odovzdávanie alebo odoberanie tepla látkou (podľa smeru elektrického prúdu), ktorou prechádza elektrický prúd, ak v látke existuje gradient teploty. Thomsonov jav zatiaľ nenašiel praktické uplatnenie.

### 10. 3 Galvanomagnetické javy

**Hallovo jav** (obr. 10.10): je vznik potenciálového rozdielu  $U_h$  na elektródach (polo)vodičovej doštičky hrúbky  $d$ , ktorou prechádza elektrický prúd  $I$  a súčasne sa nachádza v magnetickom poli s magnetickou indukciou  $B$  neparalelnou (často kolmou) so smerom vektoru prúdovej hustoty, charakterizovanom Hallovým napätím o veľkosti  $U_h$ :

$$U_h = R_h \frac{IB}{d} \quad (10.2)$$



Obr. 10.10. Schematické znázornenie Hallovho javu

**Magnetorezistenčný (Gaussov) jav:** je to závislosť rezistivity resp. konduktivity (polo)vodičov (magnetorezistorov) od magnetickej indukcie magnetického poľa kolmého na vektor prúdovej hustoty.

**Ettignshausenov jav:** vznik priečného rozdielu teplôt vo vzorke (polo)vodiča, ak ňou prechádza elektrický prúd a súčasne sa nachádza v magnetickom poli.

## 10. 4 Termomagnetické javy

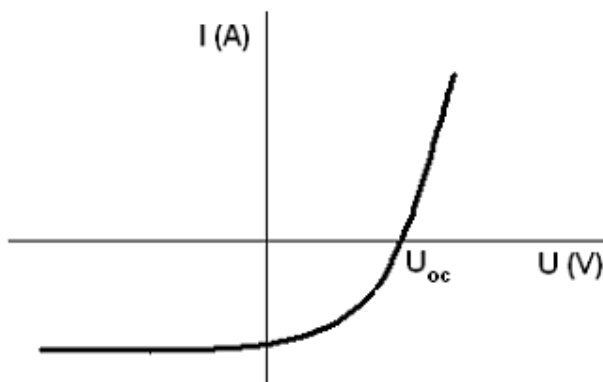
**Nernstov - Ettignshausenov jav:** vznik priečného elektrického poľa vo vzorke (polo)vodiča, ak ňou prechádza tepelný prúd a súčasne sa nachádza v magnetickom poli.

## 10. 5 Fotoelektrické javy

**Fotoelektrický jav:** je vznik voľných nosičov náboja pohltitím energetického kvanta dopadajúceho žiarenia. Rozoznávame 2 základné druhy: vnútorný a vonkajší.

**Vnútorný** - vyznačujúci sa zmenou energie elektrónov žiarením dopadajúcim na kryštál polovodiča. Tak sa elektróny z valenčného pásu dostanú do vodivostného, vzniknú voľné nosiče náboja, pár elektrón – diera, a spôsobia vlastnú vodivosť polovodiča. V spojení s pôsobením elektromagnetických polí jav delíme na:

- **fotonapät'ový (fotovoltický) jav** – je vznik elektrického napätia v dôsledku ožiarenia (osvetlenia). Najčastejšie sa premena realizuje pomocou hradlových fotočlánkov na styku kov – polovodič alebo v oblasti priechodu PN. Elektrické pole potenciálovej bariéry usmerní pohyb voľných nosičov, vznikajúcich dopadom žiarenia ako páry elektrón - diera. Usmerný pohyb vyvolá rozdiel koncentrácií, a tým aj rozdiel potenciálov. Jav je základom fotovoltických článkov. Využíva priamu premenu slnečnej energie na energiu elektrickú. Princíp činnosti fotoelektrického článku je charakterizovaný V-A charakteristikou osvetleného PN priechodu. Pri nulovom zaťažovacom prúde vznikne na osvetlenom priechode napätie  $U_{oc}$ , znázorneného na obr. 10.11.



Obr. 10. 11 V-A charakteristika osvetleného PN priechodu

- **fotomagnetoelektrický**, vyvolávajúci rozdiel koncentrácie dier a elektrónov ich vychýľovaním opačnými smermi vplyvom magnetického poľa na homogénny polovodič. Na protiľahlých čelných plochách kryštálu možno merať napätie naprázdno, alebo prúd nakrátko. Jav je základom citlivých detektorov infračerveného žiarenia.
- **Fotovodivostný**, kladný, ktorý zväčšuje vlastnú vodivosť vplyvom zväčšovania počtu voľných nosičov náboja vplyvom ožiarenia (fotorezistory) a záporný, ktorý sa znižuje vplyvom uvoľňovania minoritných nosičov náboja, rekombinujúcich s majoritnými, čím znižujú ich koncentráciu a tým i vodivosť polovodiča.

**Vonkajší**, vyznačujúci sa (foto)elektrónovou emisiou, pre ktorý je typické vystupovanie elektrónov z látky je v dôsledku jej ožiarenia. Využíva sa vo fotonásobičoch a fotokatódach.

**Gunnov jav:** je vznik mikrovlnných kmitov pripojením jednosmerného napätia na monokryštál (GaAs) za predpokladu veľkej pohyblivosti a malej intenzity elektrického poľa

alebo naopak. Ak dosiahne intenzita elektrického poľa kritickú hodnotu a udelí elektrónom dostatočnú rýchlosť, vytvorí sa na zápornej elektróde oblasť so stavom malej pohyblivosti (doména veľkej intenzity elektrického poľa), cyklicky (GHz) putujúcej ku kladnej elektróde rýchlosťou elektrónov.

**Povrchové javy:** sú vyvolané odlišnými energetickými stavmi na povrchu polovodiča od energetických stavov vo vnútri kryštálu. Atómy tvoriace poslednú mriežkovú rovinu nemajú všetky valencie nasýtené, preto povrch polovodiča predstavuje poruchu kryštálu. Prebytočné valencie vytvárajú akceptorové (Tammové) hladiny a spôsobujú tvorbu povrchových oxidových vrstiev. Opracovaním a pokrytím povrchu polovodiča možno meniť typ vodivosti.

## 10. 6 Luminiscenčné javy

**Elektroluminiscenčný jav:** vyžarovanie elektromagnetického žiarenia v látke následkom rozličných vonkajších vplyvov. Nastáva pri rekombinácii sprevádzanej vyžiarení kvanta energie - fotónu. Podmienky elektroluminiscencie sú splnené u GaAs, ZnSe, CdTe a i na PN priechodoch. Existuje aj fotoluminiscencia (žiarivky s luminofórom) a katódoluminiscencia (využitie obrazovky).

Dnes sa pod pojmom luminiscenčné látky skrátene luminofóry označujú všetky tuhé a kvapalné anorganické alebo organické látky, ktoré sú schopné premeniť vhodnú absorbovanú (neviditeľnú) energiu na viditeľné svetlo, a to tak, že tento výmenný pochod nezáleží na normálnom tepelnom žiarení (odpovedajúci Kirchhoffovmu zákonu), ale deje sa pri teplotách, ktoré sú nižšie než obvyklé teploty žhaviacich telies (tzn. nižších než 500 - 600°C). Absorbovanú energiu možno dodať luminiscenčnej látke najrôznejším spôsobom a v najrôznejšej forme. Podľa druhu a budenia sa rozoznávajú rôzne triedy "luminiscencie" a "luminofórov", ktoré sú uvedené v tab. 10.1.

Tabuľka 10.1 Triedy a druhy luminiscencie

Č. triedy	Trieda	Spôsob budenia
I	Katódoluminiscencia	náraz elektrónov
II	Fotoluminiscencia	absorbcia fotónov (ultrafialové žiarenie, röntgenové lúče, gama lúče
III	Rádioluminiscencia	nukleárne lúče (hlavne alfa) a ďalšie žiarenie z rádioaktívnych zdrojov
IV	Triboluminiscencia	mechanická energia, ktorá sa pri rozbití kryštálov dodáva atómovej väzbe
V	Bioluminiscencia	biochemické reakcie (svetielkovanie húb, hmyzu,...)
VI	Chemoluminiscencia	chemické reakcie (oxidáciou fosforu)
VII	Termoluminiscencia	tepelné budenie, pokiaľ nevedie k normálnemu tepelnému žiareniu

Princíp budenia rádioluminiscenčných látok je v podstate rovnaký ako v prípade látok katódoluminiscenčných. Rozdiel je len v tom, že katódoluminiscenčné látky sa budia priamo dopadajúcimi primárnymi elektrónmi, avšak rádioluminiscenčné látky sa budia elektrónmi sekundárnymi, ktoré vzniknú pôsobením rádioaktívneho žiarenia.

### - Princíp činnosti monitora:

Monitor - CRT (Cathode ray tube): Vo vnútri monitoru je katódová trubica, ktorá obsahuje tri elektronové trysky, tieniacu masku a sklenú obrazovku zvnútra pokrytú oddelenými, červeno, modro a zeleno fosforeskujúcimi bodmi, tzv. luminofórmami. Trysky môžu byť usporiadané do trojuholníka alebo v jednej rovine. V prvom prípade ide o obrazovku typu delta, v druhom prípade je to typ trinitron. Obrazovka typu delta má luminofóry usporiadané do tvaru pravouhlého trojuholníka, zatiaľ čo trinitron vodorovne v poradí zľava červená, zelená, modrá.

Luminofóry sú látky, ktoré po zásahu elektronovým lúčom počas určitej doby emitujú viditeľné žiarenie. Luminofóry s krátkou dobou dosvitu vyžadujú častejšie obnovovanie,



obraz tvorený luminofórmami s dlhou dobou dosvitu zas nie je možné tak rýchle prekresľovať. V prípade, že obraz nie je dostatočne často obnovovaný, kolísajú jas a obraz bliká. Tieniaca maska je kovová fólia umiestnená pred tienidlom (vnútorná časť obrazovky). Je perforovaná, aby usmernila elektronový lúč na luminofóry. Po aktivácii videosignálom vystrelia elektrónové trysky elektronové lúče. Každá tryska zasahuje luminofóry jednej farby. Tieniaca maska usmerní elektróny na konkrétny luminofór a ten, keď jej elektronový lúč zasiahne, zažiarí. Lúč začína v ľavom hornom rohu tienidla. Potom sa pohybuje po riadkoch zľava doprava a pri tom mení svoju intenzitu, takže zasiahnuté luminofóry žiaria viac alebo menej. Každá farba môže byť zobrazená zložením troch primárnych farieb luminofórov: červenej, zelenej a modrej, rôznej intenzity. Ak sú všetky primárne farby plne aktivované, vznikne biela farba, ak nie je aktivovaná žiadna, vznikne čierna. Tomuto vytváraniu farebného obrazu sa hovorí aditívny. Každý počítač obsahuje grafickú kartu, ktorá riadi zobrazovanie na obrazovke.