

# LED - GAISMAS DIODES

## Teorija un jaunākie parametri

Mārtiņš Dundurs

rect0 grupa

apl. nr.

2017. gada 31. oktobris

### 1 Lādiņnesēju rekombinācija uz PN-pārejas

Gaismas diodēs gaismas avots ir fotonu izstarošana, kad majoritātes lādiņnesēji rekombinējas ar minoritātes lādiņnesējiem. Sauksim to par *starojuma rekombināciju*. Būtībā tie ir elektroni, kas rekombinējas ar caurumiem. Šī procesa rezultātā elektroni pāriet no augstāka enerģijas līmeņa uz zemāku - tie atgriežas no vadāmības uz valences zonu. Tādā veidā tiek izdalīta enerģija  $\Delta W$ , kas var pāriet uz kristālisko režģi kā siltuma enerģija, vai arī tā var tikt izstarota kā gaismas kvants. Ja tā tiek izstarota kā gaismas kvants, tad:

$$\Delta W = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \text{ kur} \quad (1)$$

$h$  - planka konstante ( $6.62606876 \cdot 10^{-34} [Js]$ );

$\nu$  - frekvence  $[Hz]$ ;

$c$  - gaismas ātrums  $[m/s]$ ;

$\lambda$  - gaismas viļņa garums  $[m]$ .

Kopējā lādiņnesēju rekombinācija sastāv gan no starojuma, gan no *neizstarojošās rekombinācijas*. Rekombinācijas ātrumu nosaka lādiņnesēju koncentrācija. PN-pārejas termiskā līdzsvara stāvoklī kopējā lādiņnesēju koncentrācija sastāv no caurumu koncentrācijas  $p_0$  un elektronu koncentrācijas  $n_0$ .

$$p_0 = p_i + N_A; \quad n_0 = n_i + N_D, \text{ kur} \quad (2)$$

$p_i$  - patstāvīgā pusvadītāja lādiņnesēju caurumu koncentrācija;

$N_A$  - P-tipa pusvadītāja akceptoru koncentrācija;

$n_i$  - patstāvīgā pusvadītāja lādiņnesēju elektronu koncentrācija;

$N_D$  - N-tipa pusvadītāja donoru koncentrācija.

Lādiņnesēju pāru ģenerācija un rekombinācija ir proporcionāla. Proporcionalitāti izsaka šajā izteiksmē:

$$R_0 = rn_0p_0, \text{ kur} \quad (3)$$

$R_0$  - rekombinācijas ātrums;

$r$  - proporcionalitātes konstante atkarīga no materiāla (vai tas ir ar tiešo vai netiešo joslu un kāda tam ir defektu koncentrācija).

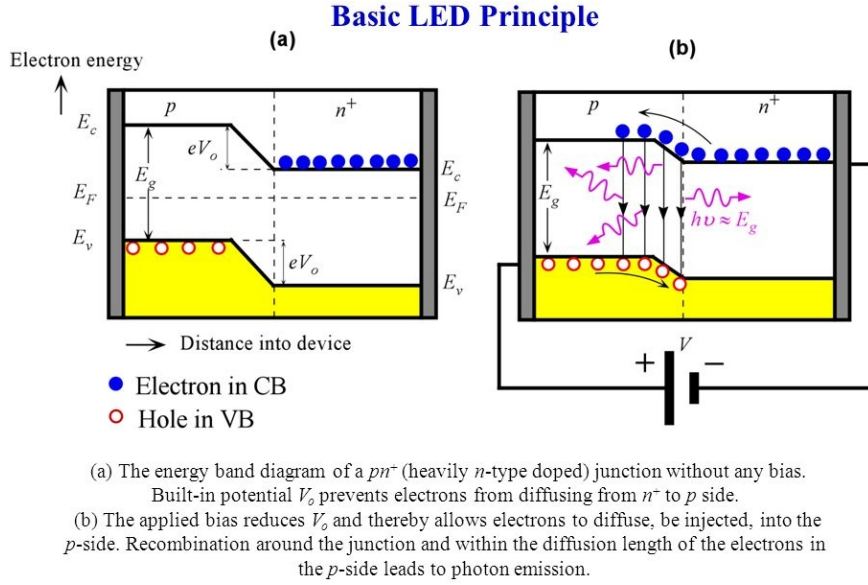
Ja mēs tagad PN-pārejas caurlaides virzienā laidīsim strāvu, tad mēs palielināsim rekombinācijas ātrumu un tagad tas būs:

$$R = \frac{\Delta n}{\tau}, \text{ kur} \quad (4)$$

$R$  - rekombinācijas ātrums ar strāvas injekciju;

$\Delta n$  - papildus lādiņnesēju koncentrācija;  $\tau$  - papildus lādiņnesēju dzīveslaiks.

Šo procedūru sauc par strāvas injekciju. Jāsaka, ka injekciju var veikt ne tikai ar strāvu, bet arī veicot apgaismošanu. Galvenā procesa būtība ir tā, ka vienā vai otrā veidā tiek palielināta lādiņnesēju koncentrācija.



Gaismas daudzumu, kas tiks izstarots diodē, noteiks tas cik daudz no kopējo lādiņnesēju rekombinācijas notikumu radis fotonu. Šo daļu izsaka lielums  $\eta_i$  - iekšējais kvantu lietderības koeficients. Tas parāda cik daudz no kopejo rekombinācijas notikumu radis fotonu un tas ir atkarīgs no pusvadītāja materiāla.

$$\eta_i = \frac{\tau_r}{\tau} \quad (5)$$

$\tau_r$  - to lādiņnesēju dzīveslaiks, kuri izstaro fotonu ( $r$  nozīmē "radiative").

Izmantojot šo lielumu, mēs varam uzrakstīt kāda būs izstaroto fotonu jauda jeb ģenerētā optiskā jauda  $P_{gen}$ . Tā ir ģenerētā tāpēc, ka neietver sevī absorbēto fotonu jaudu.

$$P_{gen} = \eta_i \left( \frac{i}{e} \right) h\nu \quad (6)$$

$i$  - strāva [A];

$e$  - elektrona lādiņš ( $1.60217662 \cdot 10^{-19}$ ) [C].

Tātad vienlaicīgi kamēr notiek fotonu ģenerācija notiek arī to absorbcija. Kad pusvadītājs absorbē fotonu, rodas jauns elektronu un caurumu lādiņnesēju pāris. To cik daudz fotonu tiks absorbēts nosaka ierīces struktūra un to varam uzrakstīt kā vēl vienu koeficientu  $\eta_e$  ( $e$  nozīmē "extraction"). Tā kā mums ir divi ierīci raksturojoši koeficienti, varam tos apvienot vienā un rakstīt izejas optisko jaudu:

$$P_{opt} = \eta_i \eta_e \left( \frac{i}{e} \right) h\nu = \eta_{ext} \left( \frac{i}{e} \right) h\nu \quad (7)$$

$\eta_{ext}$  - ārējais efektivitātes koeficients ( $ext$  nozīmē "external").

Mēs varam vienkāršot izteiksmi, atceroties, ka  $\nu = c/\lambda$  un apvienojot konstantes:

$$P_{opt} = \eta_{ext} \left( \frac{i}{e} \right) h \frac{c}{\lambda} = \eta_{ext} \left( \frac{i}{e} \right) h \frac{c}{\lambda} = \eta_{ext} \left( \frac{ch}{e} \right) \frac{i}{\lambda} \quad (8)$$

Mēs redzam ka  $P_{opt} \propto i$ . Tātad optiskā ārējā jauda ir tieši proporcionāla caur ierīci plūstošajai strāvai. Sakarība ir pamatā lineāra līdz noteiktam piesātinājuma punktam. Gaismas viļņa garumu, proti, fotona krāsu, noteiks tas cik daudz enerģijas elektrons atdos pārvarot aizliedzto zonu. Enerģija var būt dažādas, vienīgais noteikums ir tas, ka tā ir vismaz aizliedzās zonas platumā.

## 2 LED pusvadītāju materiālu izvēle

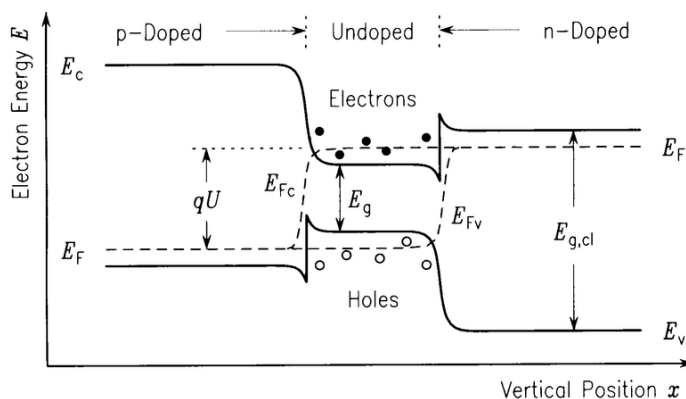
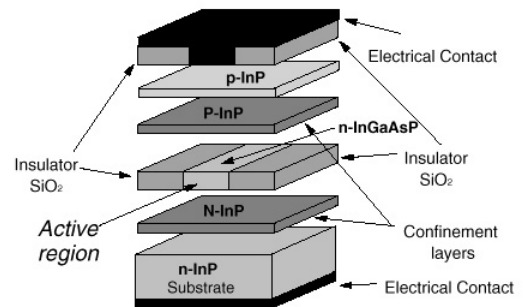
Mēs iepriekš apgalvojām, ka  $\eta_i$  ir atkarīgs no materiāla. Tātad pareiza materiāla izvēle ļaus mums palielināt optisko jaudu. Mūsdienās izmanto pārsvarā dažādus Gallija Arsenīda (GaAs) savienojumus, jo tiem ir t.s. tiešā aizliegtā josla. Tiešā aizliegtā zona nozīmē to ka elektroniem, pārejot no vadāmības uz valences zonu, nemainās tā impulsa moments. Fotonom nepiemīt pietiekami liels impulsa moments, lai tas, izstarojoties elektrona pārejā no vadāmības uz valences zonu, spētu kompensēt elektrona impulsa momenta atšķirību, kāda tā ir dažos pusvadītājos, kā piemēram, Silīcijā (Si). Jāsaka, ka gaismas izstarošana joprojām paliek iespējama, bet tādā gadījumā impulsa moments ir jākompensē kristāliskā režģa t.s. fononam. Šis gadījums izpildās reti. Līdz ar to  $\eta_i$  ir ļoti zema Si pusvadītājā.

## 3 Dubultheterostruktūra

Savukārt, lai palielinātu koeficientu  $\eta_e$ , ir jāveic izmaiņas ierīces struktūrā. Vispirms apskatīsim trīs gaismas zudumus, kuri kopā veido  $\eta_e$ .

- 1) ģenerēto fotono absorbcija, tiem neatstājot materiālu;
- 2) gaismas atstarošanās uz pusvadītāja-gaisa robežas;
- 3) pilnīgā atstarošanās (šis ir zudums virsmas gaismas diodēm SLED, bet labums sānu gaismas diodēm ELED, jo ļauj virzīt gaismu noteiktā virzienā).

(1) Ģenerēto fotonu absorbcija rada jaunu elektrona-cauruma lādiņnesēju pāri un gaisma pazūd neatstājot materiālu. (2) Tā kā gaisa refrakcijas indekss ir 1, bet izmantotā materiāla parasti ap 3.6, tad pat vislabākajā gadījumā, kad gaisma šķērso robežu perpendikulāri, 32% tās optiskās jaudas tiks atstarots atpakaļ materiālā. Šis ir otrais zudums. (3) Gaisma nespēs šķērsot materiāla-gaisa robežu, ja tuvosies tai pārāk slīpi. Šo fenomenu sauc par gaismas pilnīgo iekšējo atstarošanos. Tā ir iespējama, ja gaisma virzās no optiski blīvākas vides uz mazāk blīvu. Tādā gadījumā pie noteiktas leņķa robežvērtības - atstarošanās robežleņķa gaisma atstarosies pilnībā. Šo īpašību izmanto visplašāk optiskajos kabeļos.



norobežojošajiem slāņiem. Pats aktīvais reģions netiek dopēts. Grafiski to parasti attēlo kā  $E = f(x)$  diagrammu, kur  $E$  ir enerģijas līmenis, bet  $x$  pozīcija uz diodes virzienā no viena uz otru dopēto reģionu.

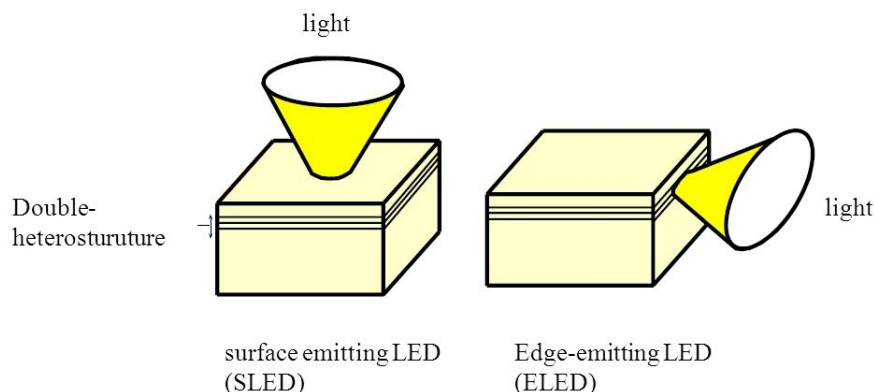
Tā kā aktīvā reģiona aizliegtā zona ir šaurāka, tad visi rekombinācijas notikumi notiks tieši tur. Rezultātā ir izveidotas tādas kā lādiņnesēju lamatas. Aktīvais reģions ļauj pozicionēt lādiņu rekombināciju vertikālā virzienā, bet lai to lokalizētu horizontāli, tiek noteiktā veidā pozicionēti elektrodi.

Lai mazinātu šos zudumus izmanto t.s. dubultheterostruktūru. Būtībā tā ir vairāku materiāla slāņu veidošana, kuros ir atšķirīgi aizliegtu zonu platumi un atšķirīgi refrakcijas indeksi. Kā mēs redzējām iepriekš, aizliegtās zonas platums ir saistīts ar izstaroto gaismas viļņu garumu, tāpēc izvēloties atbilstošus materiālus šajos slāņos ir iespējams arī mainīt izstarotās gaismas spektru.

Šajā attēlā svarīgākais ir aktīvais reģions, kur arī notiks fotonu ģenerācija. Tas ir ieskaits starp diviem norobežojošiem slāņiem - vienu p-dopētu, bet otru n-dopētu. Struktūras atslēga ir tā, ka aktīvajam reģionam aizliegtā zona ir šaurāka, nekā to

### 3.1 SLED un ELED

Ir divas principiāli atšķirīgas LED struktūras - SLED (surface light emitting diode) un ELED (edge light emitting diode). To princips ir parādīts sekojošajā attēlā.



Redzam, ka SLED gaisma tiek uzstarota uz augšu, bet ELED caur sāniem. Katrā no šiem LED veidiem tiek aizmantots atšķirīgs elektrodu izvietojums.

## 4 LED specifikācijas

**Viļņa garums (krāsa)  $\lambda$**  - parasti tas viļņa garums, kuram ir vislielākā emisija [ $nm$ ].

**Caurlaides spriegums  $V_F$**  - spriegums, pie kura sākas stimulētā emisija (mēdz norādīt pie kādas strāvas, bet parasti pie norādītās caurlaides strāvas); īsakam viļņa garumam būs nepieciešams lielāks spriegums (sarkanai krāsai  $< 2V$ , zilai  $\approx 6V$  [ $V$ ]).

**Caurlaides strāva  $I_F$**  - norāda gan darba, gan maksimālo strāvu [ $mA$ ].

**Materiāls** - PN-pārejā izmantotais materiāls vai materiālu pāris.

**Jaudas disipācija  $P_D$**  - maksimālā pieļaujamā jauda, kuru LED spēj izvadīt [ $mW$ ].

**Sprostvirkiena spriegums  $V_R$**  - pārsniedzot šo var sākties lavīncaurisite [ $V$ ].

**Temperatūra  $T$**  - ražotājs var norādīt PN-pārejas temperatūru  $T_j$ , darba temperatūru  $T_{opr}$ , uzglabāšanas temperatūru  $T_{stg}$  [ $^{\circ}C$ ].

**Pulsa strāva  $I_{FP}$**  - parasti augstāka par  $I_F$ , ar kuru var lietot LED kā mirgojošu gaismu [ $mA$ ].

**Gaismas intensitāte  $I_V$**  - jeb stiprums; to mēra milikandelās [ $mcd$ ]; ja gaisma ir infrasarkanajā vai ultravioletajā spektra daļā mēdz norādīt kā optisko jaudu [ $mW$ ].

**Gaismas plūsma  $\Phi$**  - gaismas intensitāte ir gaismas plūsma uz skatījuma leņķi, tādā veidā gaismas plūsma raksturo pavisam izstaroto gaismu [ $lm$ ]. Gaismekļa ekonomiskumu parasti norāda lumenos uz vatu  $lm/W$ .

**Skatījuma leņķis  $2\theta^{1/2}$**  - atšķirībā no kvēlspuldzēm LED gaisma ir izteikti virzīta noteiktā virzienā [ $^{\circ}$ ].

**Hromatiskuma koordinātas  $x, y$**  - parāda krāsas kvalitāti; norāda  $x$  (gaišums) un  $y$  (nokrāsa jeb krāsas fons) koordināti; zinot šīs, iespējams noteikt  $z$  (piesātinājums) pēc formulas  $z = 1 - x - y$ .

**Spektra platums** - tipiski LED izstaro gaismu normālajā (Gausa) sadalījumā un līdz ar to var norādīt platumu; lāzeru LED šis lielums ir ļoti mazs ( $< 1nm$ ) [ $nm$ ].

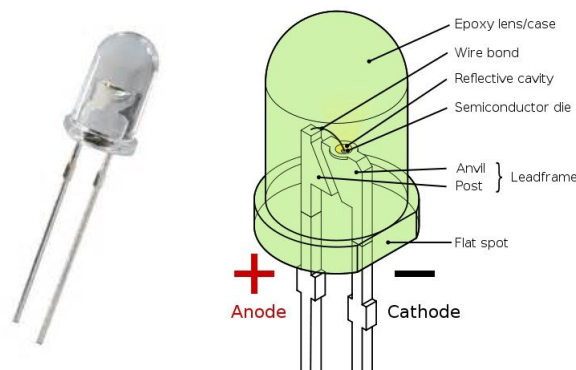
## 5 LED veidi

### 5.1 DIP (Dual In-line Package)

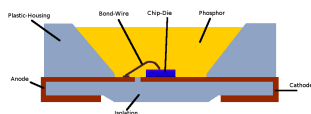
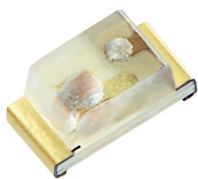
Šis LED veids ir pats pazīstamākais - DIP LED tiek ražots jau vairāk kā 20 gadus. Līdz ar to tehnoloģija ir attīstīta un pārbaudīta. Šo LED tipu izmanto kabatas lukturos, ekrānos u.c. DIP salīdzinājumā ar SMD, pateicoties to epoksīda apvaldam, ir izturīgi un piemērotāki izmantošanai ārtelpu apstākļos, kamēr SMD ir vairāk pakļauti erozijai.

DIP struktūras princips ir parādīts sekojošajā attēlā. Pati diode tiek novietota uz katoda elektroda, kurš kalpo arī kā siltumvadītājs. Diodi ieskaujošais epoksīda pārklājums kalpo gan kā gaismas izvadītājs ar atbilstošu gaismas laušanas koeficientu, gan arī kā aizsargslānis. Elektroodus pamatā atšķir pēc to garuma - garākais ir anods.

Tipiski caurlaides strāva  $I_F$  ir  $20\text{mA}$ . Spriegums  $V_F$  ir atkarīgs no krāsas, par cik aizliegtās zonas platums nosaka gaismas viļņa garumu. Bet krāsa var tikt panākta arī ar attiecīgas krāsas epoksīda pārklājumu. *Nichia* ražotāja produktu piedāvājumā<sup>1</sup> gaismas leņķis pieejams no  $13^\circ$  līdz  $140^\circ$ . Efektivitāte parasti pieejama no 35 līdz  $80\text{ lm/W}^2$ .



### 5.2 SMD (Surface Mount Device)



Šīs ir diodes, kuras izmanto SMT (Surface Mount Technology), lai tās varētu pievienot iespiedplatēs (PCB - Printed Circuit Board). SMD gaismas diodes ir daudz mazākas kā DIP. To izmēri ir no 1 līdz  $5\text{mm}$ . Tomēr līdz ar to var rasties problēmas ar siltuma izvadīšanu. Izmēri ļauj šīs diodes pielāgot visdažādākajiem mērķiem, tāpēc tās pēdējo gadu laikā tiek izmantotas visplašāk - lampās, indikatoros, kā izgaismojumu, rotājumos u.c. Lai radītu vairākas krāsas, tiek izmantotas divas vai vairāk diodes ar dažādām individuālajām krāsām tās apvienojot vienā

čipā.

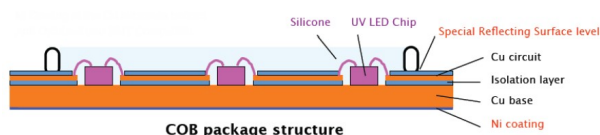
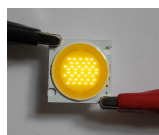
To struktūra pamatā ir tāda pati kā DIP, atšķiras tikai izmēri un elektrodu forma, kura tiek veidota tā, lai būtu savienojama ar PCB. Caurlaides strāva  $I_F$  atšķiras kā kurai diodei mērogā no 5 līdz pat  $2100\text{mA}$  jaunākajam *Nichia* izlaidumam.  $V_F$  ir atkarīgs no diožu skaita vienā SMD čipā un no krāsas. Skatījuma leņķis parasti ir plašāks kā DIP -  $100^\circ$  līdz pat  $>180^\circ$ . Efektivitāte ir no 50 līdz  $100\text{ lm/W}$ .

### 5.3 COB (Chip On Board)

SMD diodēm mīnus bija tas, ka katrai diodei nepieciešama sava ķēde, savs rezistors. Līdz ar to bija vajadzīgi vairāki izvadi. COB diodes ir savienotas ķēdē, tāpēc pietiek ar vienu avotu. To izmēri ir daudz lielāki kā SMD - 10 līdz  $40\text{mm}$ , bet tās ir daudz efektīvākas

- līdz  $200\text{ lm/W}$ . Nepieciešamais spriegums var būt no 20 līdz  $50\text{V}$ . Strāva - no 70 līdz  $1800\text{mA}$ . Mīnus ir tas, ka šīs diodes nevar izmantot daudzkrāsu vajadzībām. Nav iespējams mainīt gaismas līmeni.

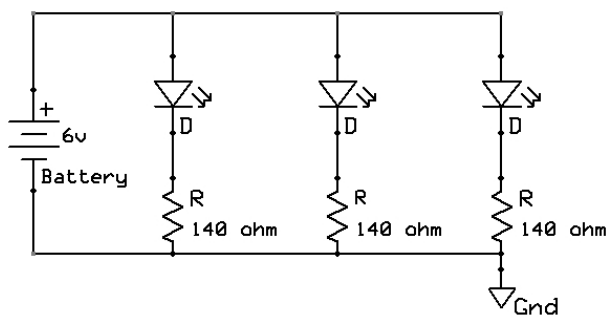
Tā kā šo diožu ekonomiskums ir vislielākais, tās ir ļoti izdevīgi izmantot uz telefoniem un pārnēsājamajiem datoriem, kur enerģijas taupība ir prioritāte. Šī veida diodes izmanto telefonu kameru zipspuldzēs, prožektoros, ielu apgaismojumā u.c. Jaunākās pieejamās diodes ir MCOB (Multiple Chip On Board), kur ir vairāki čipi uz vienas pamatnes.



<sup>1</sup>[http://www.nichia.co.jp/en/product/led\\_search.html?op=app=au\\_switch](http://www.nichia.co.jp/en/product/led_search.html?op=app=au_switch)

<sup>2</sup><https://www.linkedin.com/pulse/comparison-differences-between-led-technologies-dip-vs-doris-li>

## 6 LED ķēdes



Parasti par LED slēgumu ķēdēm lietotājam nav jāuztraucas, jo, piemēram, LED spuldzes tiek ražotas kopā ar draiveri, kas ļauj tās slēgt uzreiz pie tīkla. Draivera uzdevums ir nodrošināt specificēto strāvu un spriegumu. Ja netiek nodrošināta stabila LED barošana, tad spuldzes dzīveslaiks ievērojami samazinās.

Ja tomēr LED tiek slēgts pašrocīgi, tad, lai nodrošinātu darba strāvu, tā jāslēdz virknē ar rezistoru. Nepieciešamo rezistora pretestību aprēķina pēc formulas:  $R_s = (V_{IN} - V_F)/I_F$ , kur  $V_F$  - nepieciešamais LED spriegums, bet  $I_F$  - LED strāva. Ja vairākas LED slēdz virknē, tad:

$$R_s = (V_{IN} - (V_{1F} + V_{2F} + \dots + V_{nF}))/I_F \quad (9)$$

Ja mēs slēdzam diodes paralēli, tad mums noteikti ir katrai jāpievieno rezistors. Ķēde strādās arī bez individuāliem rezistoriem, tomēr tādā gadījumā slēgums nav uzticams, par cik diožu vadītspējas atkarīgas arī no temperatūras un rezultātā katrā paralēli slēgtā diodē var nebūt viena un tā pati strāva.

Kombinācijā ar Zēnera diodi jeb stabilitronu iespējams veidot sprieguma līmeņa indikatoru. Gaismas diode iedegsies tad, kad tiks pārsniegts stabilitrona stabilizācijas spriegums. Ja diode jāpieslēdz pie maiņstrāvas, tad ir jāveido strāvas taisngriešanas ķēde.  $0.47 \mu F$  ieejas kondensatora uzdevums ir vājināt ieejas spriegumu, bet  $120 \Omega$  rezistoru uzdevums ir ierobežot strāvu. Zēnera diode kopā ar  $47 \mu F$  kondensatoru veido filtru, kurš kombinācijā ar taisngriezi nodrošina gandrīz konstantu līdzspriegumu.

