

Laboratorul 3.

Tranzistorul bipolar. Caracteristici statice, aplicații în curent continuu. Montaje practice uzuale.

1 Scopul lucrării

Utilizarea tranzistorului bipolar de tip NPN în aplicații uzuale specifice montajelor de curent continuu. Familiarizarea cu circuitele practice bazate pe tranzistorul bipolar. Observarea experimentală, calitativă a caracteristicilor circuitelor de tip *senzor tactil*, *senzor tactil îmbunătățit cu grupare Darlington*, *senzor crepuscular*, *generator de curent constant pentru comanda LED-urilor*.

2 Noțiuni teoretice

2.1 Tranzistorul bipolar - aspecte fundamentale simplificate

Tranzistorul bipolar(en. Bipolar Junction Transistor - BJT) este o componentă de circuit activă care poate produce la ieșire un semnal de o putere mai mare (semnal comandat) decât semnalul de comandă (de la intrarea lui). Această putere suplimentară provine dintr-o sursă externă (o sursă de tensiune). În montajele electronice, tranzistoarele sunt poziționate în schemă astfel încât, în funcție de semnalul de comandă, acestea distribuie către ieșire a semnalului direct de la alimentare, pastrând pe intrare o impedanță mare (consumă un curent foarte mic din semnalul de la intrare).

Tranzistorul are trei terminale: bază, emitor și colector. Pentru a evita confuziile, vom nota potențialul dintr-un terminal cu V și indice numele terminalului:

- V_B pentru potențialul din bază (măsurat față de GND), analog pentru emitor și colector.
- V_{CC} este tensiunea de alimentare care intră în colector; este mereu pozitivă;
- V_{EE} este tensiunea de alimentare care intră în emitor; este, de obicei, negativă.

Tensiunea dintre două potențiale este indicată de un dublu indice:

- U_{BE} pentru tensiunea bază-emitor;
- U_{CE} pentru tensiunea colector-emitor, etc.

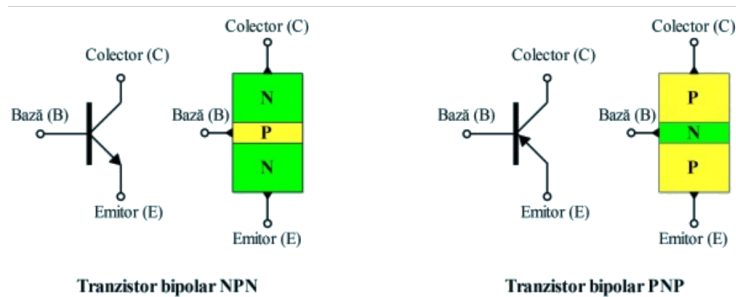


Figura 1: Simbolul și structura tranzistorului bipolar

2.2 Regimurile de funcționare ale tranzistorului bipolar

Tranzistoarele bipolare sunt de două tipuri: NPN și PNP (Figura 1). Ele pot funcționa în patru regimuri distincte:

1. Blocaj (BL - en. cut-off) - ambele joncțiuni sunt polarizate invers. Tranzistorul nu conduce curentul. Îl putem asemăna cu un întrerupător deschis, care nu conduce curentul (stare logică OFF)./
2. Regiunea Activă Normală (RAN - en. Forward-active sau active) - joncțiunea BE este polarizată direct, joncțiunea BC este polarizată invers. Acest regim de funcționare este în mod uzual utilizat în montajele analogice, unde tranzistorul se comportă ca o sursă de curent comandată în curent. Vom detalia puțin mai târziu modul de calcul pentru acest regim.
3. Saturația (SAT - en. saturation) - ambele joncțiuni sunt polarizate direct. Curentul de comandă nu mai poate fi "transpus" într-un curent comandat. Explicație: I_C a atins valoarea maximă când $U_{CE} = 0$. Curentul de colector nu va putea fi crescut mai mult decât această limită. Altfel spus, tranzistorul, indiferent de factorul de supracomandă (orice curent de bază mai mare decât cel necesar obținerii valorii maxime a curentului de colector) el nu mai poate incrementa curentul din colector. Curentul din colector depinde nu doar de tranzistor, ci de circuit $I_C = \frac{U_{CC}}{R}$. În saturație tranzistorul poate fi asemănat cu un întrerupător închis, care conduce curentul electric (stare logică ON)
4. Regiunea Activă Inversă (RAI - en. Reverse active region, inverse active sau inverted) - Colectorul interschibă rolul cu Emisorul, astfel joncțiunea BE eeste polarizată invers, iar joncțiunea BC este polarizată direct. Putem spune că acest regim nu este optimal, din cauză că, din asimetria construcției, a dopajului terminalelor de Colector, respectiv Emisor și din cauza geometriei sale, amplificarea va fi chiar și cu un ordin de mărime mai mică decât în RAN. Acest regim este rar utilizat, în circuite de fail-safe și în unele circuite logice ce utilizează tranzistoare bipolare (TTL).

Principiile de funcționare în Regiunea activă normală

La funcționarea în Regiunea Activă Normală (RAN) cei NPN respectă următoarele reguli (pentru PNP inversați sensul căderilor de tensiune):

1. În colector valoarea potențialului este mai mare decât în emitor;
2. Joncțiunile PN (bază-emitor, bază-colector) pot fi analizate similar diodelor (Figura 2). Dioda bază-emitor este polarizată direct, iar dioda bază-colector este polarizată invers;
3. Orice tranzistor are valori maxime pentru I_C , I_B și U_{CE} . Depășirea lor va duce la distrugerea tranzistorului. Alți parametri de care trebuie să ținem cont sunt: puterea disipată ($I_E \cdot U_{CE}$), temperatura de funcționare, etc;
4. Dacă primele 3 reguli sunt respectate, I_C este direct proporțional cu I_B și poate fi scris sub forma:

$$I_C = h_{fe} \cdot I_B = \beta I_E \quad (1)$$

unde h_{fe} este amplificarea de curent (în general, de ordinul sutelor). Atât I_C cât și I_E circulă înspre emitor.

Observație: Curentul de colector I_C , nu se datorează polarizării directe a ”diodei” bază-colector, ci altor fenomene specifice tranzistorului. Joncțiunea bază-colector se află în conducție inversă. Prin polarizarea directă a joncțiunii bază-emitor, din emitor (puternic dopat) purtătorii majoritari vor inunda semiconductorul bazei. O parte din ei se vor scurge prin bază, iar surplusul va forma curentul de colector.

Observație: h_{fe} nu este un parametru în jurul căruia am vrea să construim un circuit (adică un circuit care se bazează pe o anumită valoare a lui h_{fe}). El variază odată cu temperatura, curentul de colector I_C , și cu tensiunea colector-emitor U_{CE} (direct proporțional).

Datorită regulii 2 nu putem aplica o tensiune mare între bază și emitor deoarece dacă valoarea tensiunii din bază este mai mare cu mai mult de $0.6V - 0.8V$ decât cea din emitor, curentul crește semnificativ și poate fi depășit ușor pragul de curent maxim (ceea ce duce la distrugerea tranzistorului). De aceea, considerăm că în cazul unui tranzistor care funcționează normal $V_B \approx V_E + 0.6V$. Rezultă:

$$V_B = V_E + U_{BE} \quad (2)$$

Rețineți - esența funcționării tranzistorului

Din relația

$$I_C = h_{fe} \cdot I_B = \beta I_E \quad (3)$$

observăm pe scurt și utilitatea tranzistorului: un curent mic aplicat în bază poate controla un curent mult mai mare care circulă prin colector!

2.3 Verificarea integrității joncțiunilor tranzistorului folosind multimetrul - Tester de diodă

După cum putem observa din Figura 2, static, multimetrul ce poate fi setat pe funcția de Tester de diode va "vedea" joncțiunea BE și BC ca pe două diode. Folosind multimetrul putem testa numai integritatea joncțiunilor individuale. Verificăm dacă cele două joncțiuni există, dacă ele conduc într-o singură direcție și căderea de tensiune pe joncțiune la curentul de test generat de multimetru.

- Dacă una sau ambele joncțiuni nu conduc în nicio direcție sau dacă una sau ambele joncțiuni indică rezistență mică în ambele direcții (scurtcircuit), putem spune cu siguranță că tranzistorul trebuie înlocuit.
- Se întâmplă în multe cazuri ca distrugerea joncțiunii BE să ducă la distrugerea joncțiunii BC, și să măsurăm un scurtcircuit între E și C. În acest caz, concluzia este aceeași, tranzistorul trebuie înlocuit.
- Dacă măsurătorile ne arată faptul că cele două joncțiuni sunt întregi, putem spune cu o probabilitate crescută că tranzistorul este funcțional. Totuși, trebuie măsurat și factorul de amplificare h_{fe} . Există multimetre ce pot face această măsurătoare sau această evaluare poate fi făcută din măsurători în timpul funcționării montajului. Există și cazuri în care tranzistorul are una dintre joncțiuni parțial distrusă, multimetrul indică faptul că joncțiunile se comportă corespunzător, dar factorul de amplificare este puternic diminuat.

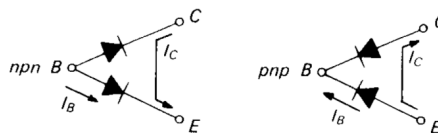


Figura 2: Tranzistorul măsurat folosind un multimetru setat pe modul "tester de diodă"

2.4 Creșterea amplificării folosind tranzistoare compuse: grupările uzuale Darlington și Sziklai (Super-G)

Uneori, în montajele electronice, din motive tehnice (e.g. utilizarea curenților de comandă - de bază - de ordinul μA pentru comanda curenților de colector/emitor mult mai mari - ordinul sutemlor de mA sau chiar A) nu putem realiza amplificarea în curent folosind un singur tranzistor. Este, așadar, necesar să utilizăm montaje complexe, compuse din mai multe tranzistoare cascade. Tranzistoarele pot fi compuse și pot fi echivalate matematic cu un singur tranzistor (aspectele teoretice detaliate pot fi consultate în bibliografia cursului). În cadrul îndrumarului vom aborda două dintre cele mai utilizate grupări/compuneri de tranzistoare: tranzistorul compus Darlington și tranzistorul compus Sziklai (cunoscut în literatura de specialitate autohtonă ca Super-G).

2.4.1 Tranzistorul compus Darlington

Tranzistorul compus Darlington reprezintă o grupare de 2 tranzistoare de același tip comandate în cascadă (a nu se confunda cu amplificatorul tip "cascodă"). Curentul comandat al primului devine curent de comandă pentru următorul.

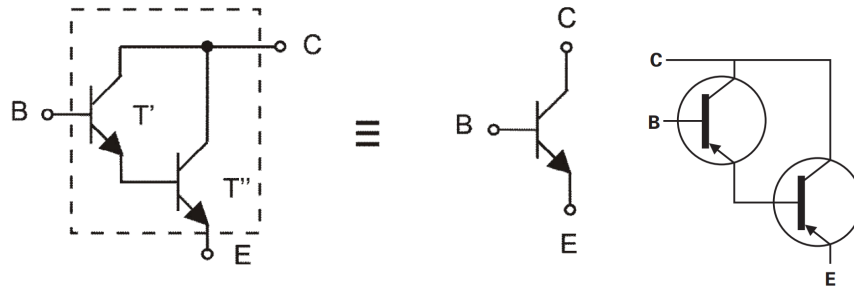


Figura 3: Tranzistorul compus Darlington NPN (sus) și PNP (jos)

Putem observa în Figura 3 schema unui tranzistor compus Darlington de tip NPN și PNP. Intuitiv, considerând curentul de bază al tranzistorului T' neglijabil, și având în vedere Legea pe curenți a lui Kirchhoff, putem spune că:

- amplificarea în curent a grupării, $\beta_{Darlington}$ este aproximativ $\beta_{Darlington} = \beta_{T'} \cdot \beta_{T''}$;
- Căderea de tensiune pe joncțiunea BE a grupării $U_{BE-Darlington}$ este $U_{BE-Darlington} = U_{BE-T'} + U_{BE-T''}$.

Observație: Un tranzistor Darlington are ca avantaje: simplitatea, amplificare în curent egală cu produsul amplificărilor tranzistoarelor compuse, iar ca dezavantaje căderea de tensiune dublă pe joncțiunea BE, comutația mai lentă (ce generează un defazaj al semnalului). Tranzistorul Darlington este larg utilizat atât în zona digitală (acționarea releelor, a motoarelor, a sarcinilor electrice de C.C.) cât și în circuitele analogice de joasă frecvență (amplificatoare audio - în clasă A, B, AB, G, H -, a surselor de tensiune liniare și a etajelor tip repetor).

2.4.2 Tranzistorul compus Sziklai - Super-G

Tranzistorul compus Sziklai reprezintă o grupare de 2 tranzistoare PNP și NPN tip comandate în cascadă, similar cu gruparea Darlington. Similar cu Darlington, și în cazul Sziklai, curentul comandat al primului tranzistor devine curent de comandă pentru următorul.

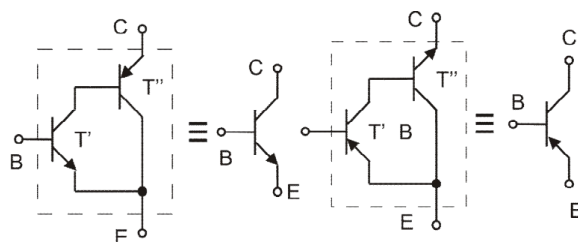


Figura 4: Tranzistorul compus Sziklai (Super-G) tip NPN (stânga) și PNP(dreapta)

Putem observa în Figura 4 schema unui tranzistor compus Sziklai de tip NPN și PNP. Recunoașterea grupării este dată de tranzistorul T' (tranzistorul de comandă, de semnal mic). Intuitiv, considerând curentul de bază al tranzistorului T' neglijabil, și având în vedere Legea pe curenți a lui Kirchhoff, putem spune că:

- amplificarea în curent a grupării, $\beta_{Darlington}$ este aproximativ $\beta_{Darlington} = \beta_{T'} \cdot \beta_{T''}$;
- Căderea de tensiune pe jonțiunea BE a grupării $U_{BE-Darlington}$ este $U_{BE-Darlington} = U_{BE-T''}$.

Observație: Un tranzistor Sziklai are ca avantaje față de Darlington stabilitatea în relația cu sarcina și o bandă de frecvență mai mare în care poate funcționa. Amplificarea în curent este, ca și în cazul grupării Darlington, egală cu produsul amplificărilor tranzistoarelor compuse, iar ca dezavantaje: necesitatea utilizării a două tranzistoare de tipuri diferite,. Tranzistorul Sziklai este larg utilizat în zona circuitelor analogice de joasă frecvență (amplificatoare audio - în clasă A, B, AB, G, H -, a surselor de tensiune liniare și a etajelor tip repetor). În cazul amplificatoarelor audio de obicei sunt utilizare împreună cu o grupare Darlington, după cum puteți observa în Figura 5.

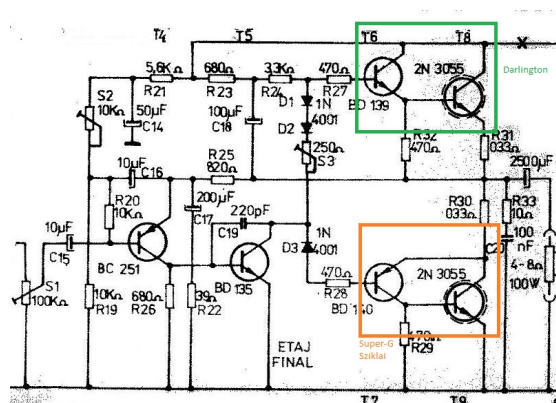


Figura 5: Amplificator audio cu etajul final combinat: Darlington (verde, sus), Sziklai-Super-G(portocaliu, jos)

2.5 Circuite practice cu tranzistoare bipolare

2.5.1 Tranzistorul bipolar folosit ca întrerupător

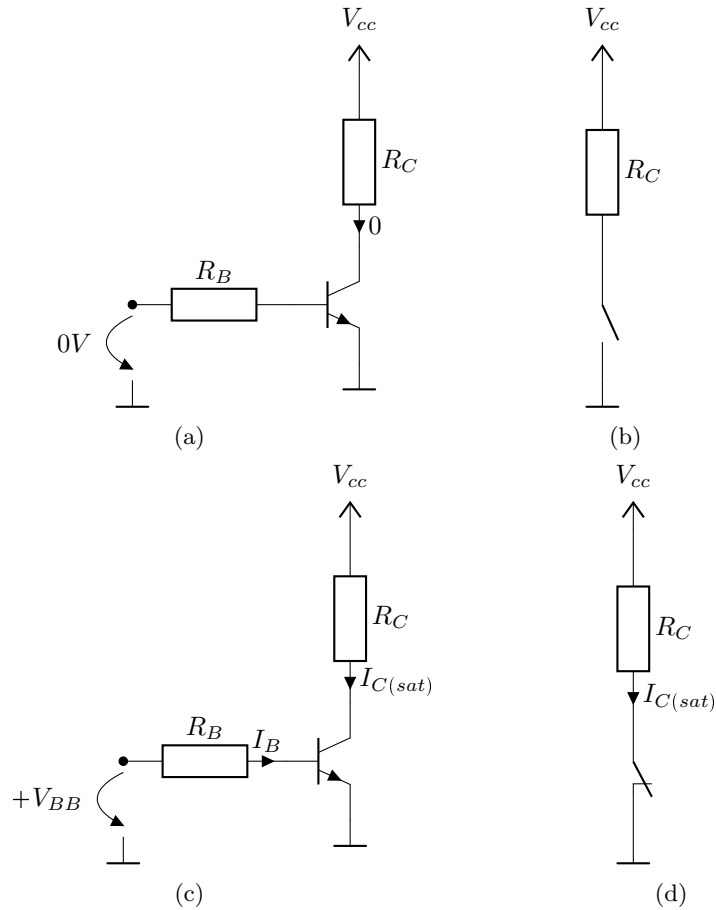


Figura 6: Tranzistor blocat vs Tranzistor saturat

Pe lângă regimul de funcționare în care tranzistorul se comportă (pseudo)liniar pentru semnale mici din punct de vedere al dependenței curentului de ieșire față de cel de intrare, în multe aplicații (simple, dar des utilizate), tranzistorul este folosit în regim de saturație (o explicație simplistă a regimului ar fi că nu mai poate crește curentul de colector dacă este crescut în continuare curentul din bază), rolul acestuia fiind de comutator închis. Când tensiunea din bază este mică (apropiată de $0V$) tranzistorul este blocat și el nu conduce curent, comportându-se asemănător unui întrerupător deschis.

2.5.2 Tranzistorul bipolar folosit ca intrerupător - amplificator de curent - senzor de atingere

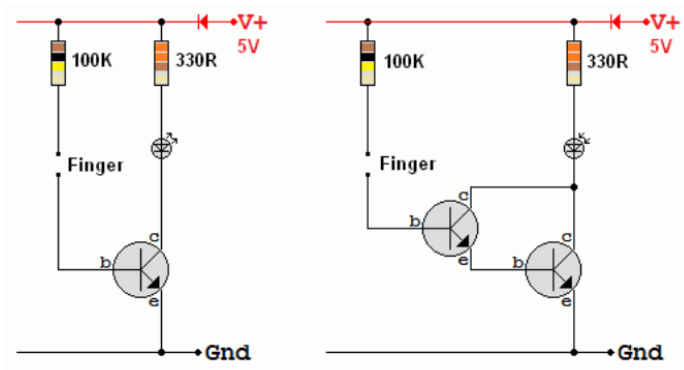


Figura 7: Circuite de realizare a întrerupătorului electronic declanșat prin atingere

În diferite dispozitive electronice tranzistorul este utilizat cu rolul de senzor de atingere. În momentul în care o persoană atinge cele 2 contacte din dreptul marcajului "Finger" rezistența degetului (de obicei de ordinul sutelor de $k\Omega$ sau de ordinul $M\Omega$) conduce curentul de la linia V+ de alimentare către baza tranzistorului. Acesta amplifică curentul și LED-ul se aprinde. În circuitul din dreapta este utilizat tranzistorul compus Darlington a cărui amplificare în curent este mai mare decât în cazul folosirii unui singur tranzistor. În acest caz curentul este amplificat cu o valoare mai mare, astfel că, și pentru rezistențe mari la atingere, LED-ul se aprinde puternic. Circuitul poate fi folosit, de asemenea și pentru a semnaliza atingerea către microprocesoare.

3 Desfășurarea lucrării

În cadrul acestui laborator veți construi montajul folosind plăci de test care nu necesită lipirea componentelor, ci doar plasarea lor în sloturi și interconectarea lor folosind conductori special dedicați.

Din laboratorul precedent (Dioda Semiconductoare), ne reamintim faptul că în interiorul breadboard-ului există bare care realizează interconexiunea pe o linie, iar pe laterale - pe barele dedicate distribuției alimentării (notate cu + și -) legăturile sunt făcute pe coloană.

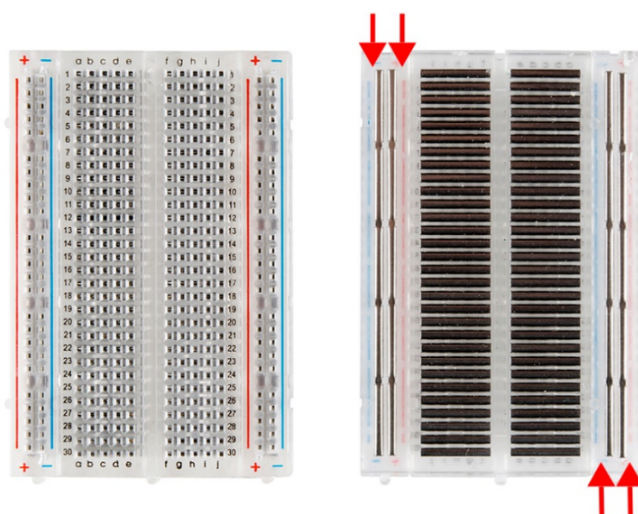


Figura 8: Breadboard-ul și conexiunile interne

Exemplu de realizare a unui circuit simplu - un LED înseriat cu o rezistență și întreg ansamblul alimentat de la o baterie.

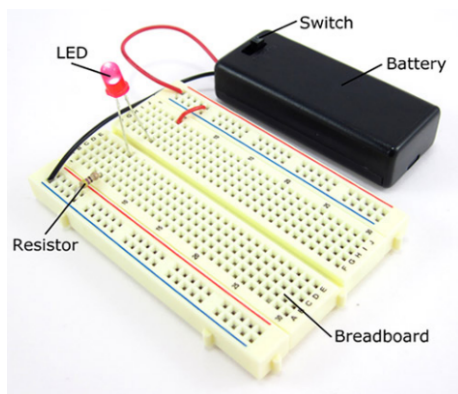


Figura 9: Exemplu de utilizare

Implementați pe breadboard schemele propuse în secțiunile următoare folosind tranzistor de tip NPN (BC547C). Identificați valorile rezistențelor folosind codul culorilor. Tranzistorul utilizat în cadrul montajului va fi BC547C. Identificați

terminalele componente fizice pentru plasarea sa corectă în circuit pe baza figurii de descriere.

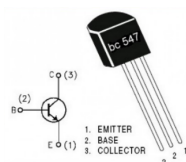


Figura 10: Identificarea pinilor pentru BC547

Ne dorim să observăm comportarea tranzistorului ca amplificator în diferite montaje elementare uzuale.

3.1 Senzor de atingere folosind tranzistori bipolari

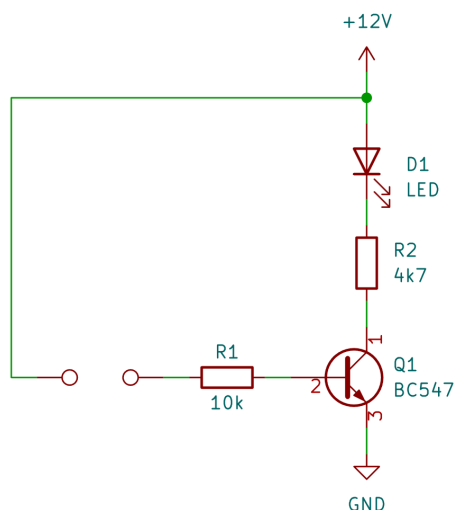


Figura 11: Senzor de atingere cu TBIP simplu

Realizați circuitul pentru întrerupătorul electronic realizat cu tranzistor și cu LED. Alimentați cu o tensiune cuprinsă între 10V și 12V de la sursa de tensiune. Urmăriți schemele din Figura 11

- Atingeți firele lăsate în aer. Închideți circuitul prin intermediul corpului. Apoi, închideți circuitul prin inserierea cu colegul de la masa de lucru. Ce observați referitor la intensitatea luminoasă a LED-ului? **Ce observați?** Explicați comportamentul circuitului.
- Modificați circuitul astfel încât să utilizați tranzistorul compus Darlington (Figura 12) și atingeți cu un deget baza tranzistorului și cu altul + ul de la alimentare. **Ce observați față de montajul precedent?** Pentru un contact cu rezistență mare (dacă vă inseriați cu colegul de la masa de

lucru pentru a închide circuitul) se aprinde LED-ul mai puternic decât în cazul precedent? Explicați de ce se întâmplă acest fenomen.

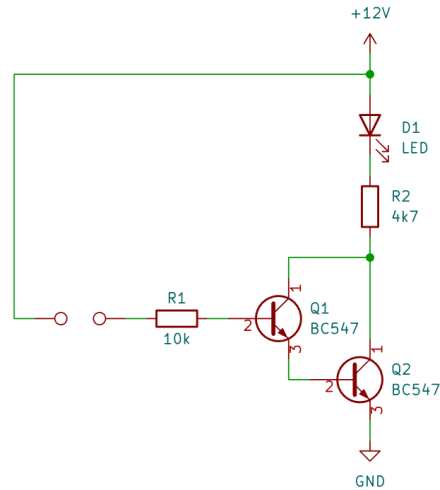


Figura 12: Senzor de atingere cu TBIP Darlington

3.2 Întrerupător crepuscular folosind fotorezistorul ca traductor

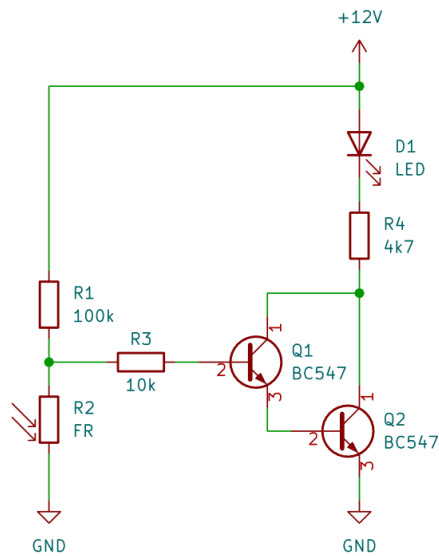


Figura 13: Senzor crepuscular

O aplicație des întâlnită o reprezintă controlul unui efector (sau actuator), adică a unui element care *face ceva folosind energie electrică* folosind semnalul dat de un traductor, adică semnalul generat de un element care *convertește o mărime fizică nonelectrică*(intensitate luminoasă, temperatură, presiune, vibrații, etc.)

într-o mărime electrică (tensiune, curent, rezistență, capacitate, inductanță).

Un întrerupător crepuscular este o aplicație particulară a situației enunțate anterior. El are rolul să crească intensitatea unei surse luminoase (e.g. bec sau LED) când intensitatea luminii ambientale (care excită senzorul) este sub o anumită valoare (prag - en. threshold). În Figura 13 aveți figurată schema unui întrerupător crepuscular ce utilizează un tranzistor Darlington care controlează curentul printr-un LED folosind ca referință ieșirea unui divizor de tensiune realizată cu o rezistență de valoare fixă și un fotorezistor (piesă a cărei rezistență electrică depinde de intensitatea luminoasă).



Figura 14: Fotorezistor)

- Din setul de piese de laborator selectați fotorezistorul (Figura 14). Măsurați folosind multimetrul valoarea rezistenței electrice a acestuia când este iluminat (iluminați-l cu lanterna telefonului) și când nu este iluminat (acoperiți-l cu degetul sau cu un obiect opac). **Ce observați?** Explicați comportamentul dispozitivului utilizat din punct de vedere al variației rezistenței în funcție de iluminare.
- Modificați circuitul de la punctul anterior astfel încât să integrați fotorezistorul și un rezistor de valoare fixă conform schemei din Figura 13. Alimentați circuitul. Observați starea ledului (luminează mai puternic? mai slab? deloc?) în funcție de gradul de iluminare la care este supus fotorezistorul. **Ce observați ?** Explicați de ce se întâmplă acest fenomen.

3.3 Generator de curent constant pentru comanda LED-ului sau a altor sarcini controlate în curent - avansat

Dacă ați terminat de rezolvat punctele anterioare, înseamnă că ați deprins îndemânarea de a lucra repede (și corect :)) cu breadboard-ul și cu aparatura de laborator. În cazul acestui circuit vom pune în evidență două aspecte: comanda corectă a unui LED și în general a diodelor (cum este de exemplu dioda Stabilizatoare) și circuitul de tip drenă de curent ce utilizează tranzistoare bipolare (en. Current Drain/Current Sink circuit). Realizați montajul din schema reprezentată în Figura 15.

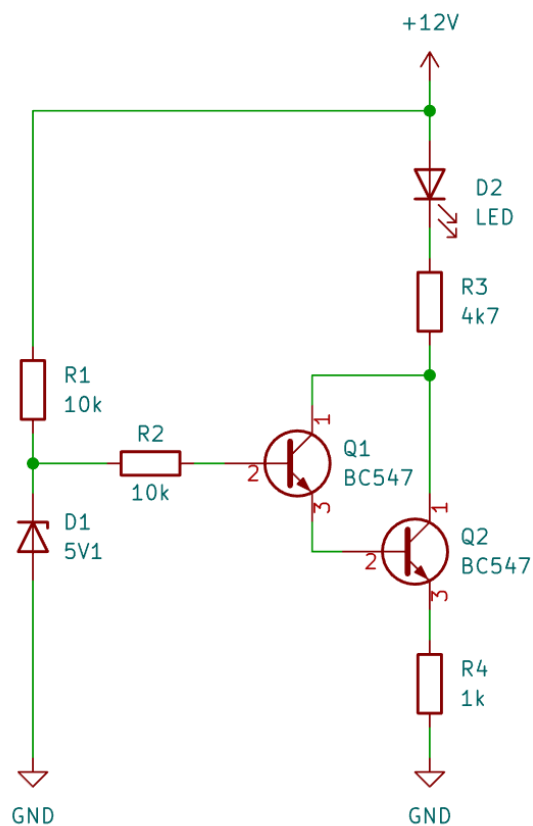


Figura 15: Generator de curent constant tip parametric (fără feedback)

- Alimentați montajul de la o tensiune de 10V până la o tensiune de 20V. Măsurați căderea de tensiune pe rezistența din emitor. Cât de mult variază căderea de tensiune?
- Converteți această tensiune în curent. Ce puteți spune despre variația acestui curent raportat la variația alimentării?