

8. mérés

Aktív elektronikus eszközök vizsgálata

A mérés célja

A mérés célja különböző diszkrét félvezető diódák (réteg, Schottky, Zener, LED) és bipoláris tranzisztorok vizsgálata: karakterisztikájuk, kisjelű paramétereik és dinamikus tulajdonságaik mérése. A mérendő eszközök fizikai tulajdonságainak megismertetése mellett fontos célkitűzés a mérések elvégzésére szolgáló mérési eljárások, ill. mérési összeállítások és *célműszerek*, bemutatása, ill. gyakorlása.

A mérés elméleti alapjai

Hivatkozások, felkészüléshez ajánlott irodalom

- [1] Dr. Pap László, Elektronika I, Egyetemi elektronikus jegyzet
 - 3.1. fejezet: A félvezető eszközök működésének fizikai alapjai
 - 3.2. Bipoláris tranzisztor (n-p-n típusú)
 - 4.1. A kivezérelhetőség vizsgálata (Bevezető példa)
- [2] Elektronikus Eszközök Tanszéke, Mikroelektronika
 - A pn átmenet működése: Dióda karakterisztikák
- [3] Dr. Székely Vladimír: Elektronika I. Félvezető eszközök, Műegyetemi Kiadó, 55054, Budapest, 2001.
 - Dióda, Zener-dióda, bipoláris és térvezérlésű tranzisztorok karakterisztikái, ezen félvezető eszközök helyettesítő képei, a helyettesítő képekben szereplő elemek definíciói.

Feladatok a felkészüléshez

A mérést megelőző otthoni felkészülésként végezze el az alábbiakat önállóan!

1. Olvassa át alaposan *A mérés elméleti alapjai* c. szakaszban hivatkozott irodalmat!
2. A *Laboratórium 1.* c. tárgy WEB-es adatlapja alatt töltse le és válaszolja meg *írásban* az Ön számára kijelölt feladatot!
3. Olvassa el és gondolja végig a *Mérési feladatokat*!
4. Válaszolja meg a (mérési leírás végén található) *Ellenőrző kérdéseket*!

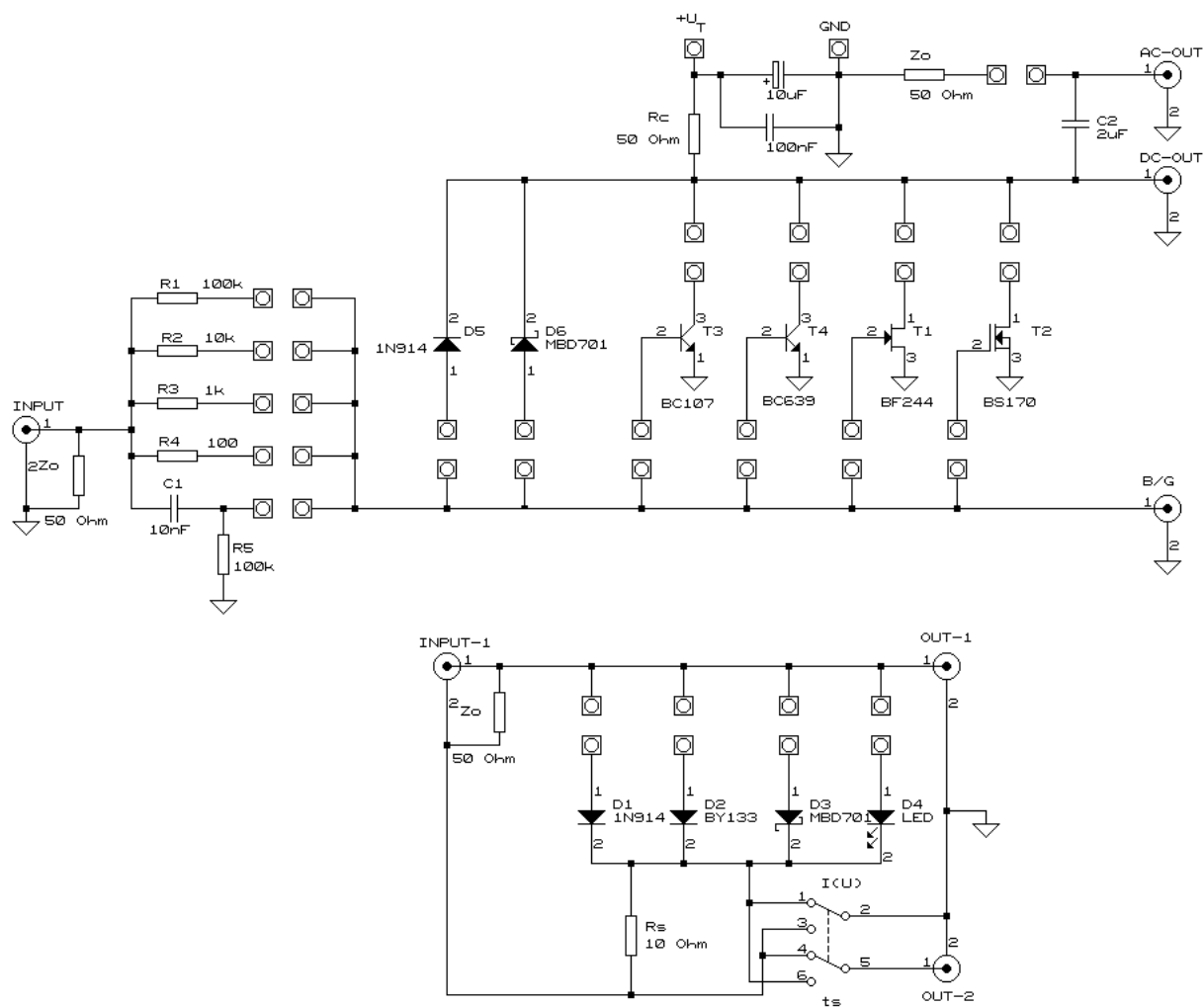
Az írásbeli feladatok (kézzel írott formában) a mérésvezetőnek mutathatók be. Elkészítésük ugyan nem kötelező, de erősen javasolt az alapos felkészülés érdekében, és a mérés során használni kell tudni a feladatok megoldása során gyűjtött tapasztalatokat.

A felkészülést a mérésvezető szűrőpróbaszerűen szóbeli kérdésekkel is ellenőrizheti.

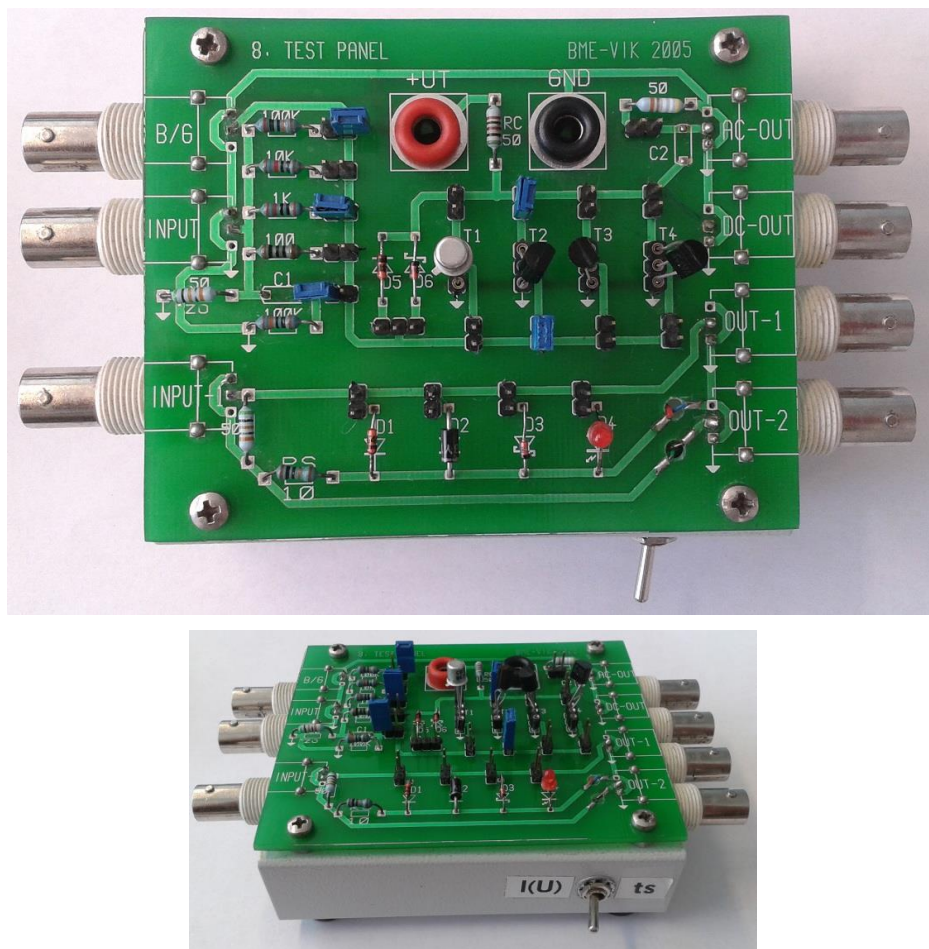
Alkalmazandó műszerek

Digitális multiméter (6½ digit)	Agilent 34401A
Digitális multiméter (3½ digit)	Metex ME22T
Tápegység	Agilent E3630A
Karakterisztikarajzoló	Hameg HM6042
Oscilloszkóp	Agilent 54622A
Függvénygenerátor	Agilent 332220A

Tesztpanel



8-1. ábra. Tesztpanel kapcsolási rajza



8-2. ábra. Tesztpanel fényképe

Bevezető

A félvezetők elmélete igen szerteágazó és mély tudást képvisel. Ezen útmutatót megpróbáltuk úgy megírni, hogy azok számára is értelmezhető legyen, akik a félvezetőkre fekete-doboz modellként tekintenek, tehát csupán a működésük módja érdekli, de a mögöttes jelenségek nem foglalkoztatják. A tárgy honlapján található Mellékletekben pedig megpróbálunk egy ismétlő áttekintést adni azoknak, akik a téma iránt mélyebben érdeklődnek.

A Mellékletek tehát szorgalmi jelleggel áttanulmányozandók, de nem képzik a tananyag szerves részét.

Dióda működése és jellemzése

Dióda statikus karakterisztikája

Az ideális dióda karakterisztikája exponenciális, és a következő egyenlet írja le:

$$I(U) = I_{S0} \left(\exp \left(\frac{U}{U_T} \right) - 1 \right) \quad (8-1)$$

ahol a jelölések a következők:

- I_{S0} : a telítési (szaturációs) áram
- U_T : termikus feszültség

A termikus feszültség értéke:

$$U_T = \frac{kT}{q} \quad (8-2)$$

ahol k a Boltzmann-állandó, T a hőmérséklet, q pedig az elektron töltése. U_T értéke szobahőmérsékleten körülbelül 26 mV (ezt az értéket illik ismerni).

A telítési áram értéke széles tartományban változhat, körülbelül 10^{-10} vagy annak néhány nagyságrendnyi környezetében található érték.

A karakterisztikát a feszültségre átírva a következőt kapjuk:

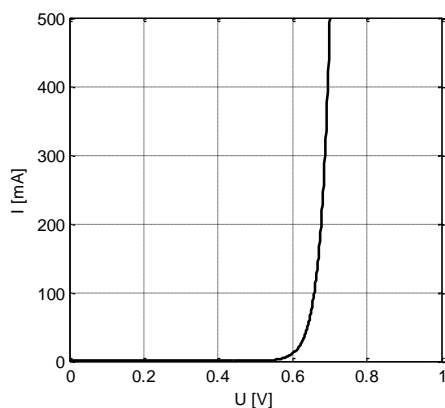
$$U(I) = U_T \left[\ln \left(\frac{I}{I_{S0}} + 1 \right) \right] \quad (8-3)$$

Gyakorlatban a dióda karakterisztikája nem teljesen ideális, hanem a következő egyenlettel közelíthető:

$$I(U) = I_{S0} \left(\exp \left(\frac{U}{mU_T} \right) - 1 \right) \quad (8-4)$$

ahol m egy nagyjából 1-2 tartományban található, úgynevezett idealitási tényező.

A 8-3. ábra jellegre helyesen ábrázolja egy ideális dióda nyitó irányú karakterisztikáját. Látható, hogy egy adott feszültség szint fölött a dióda árama rohamosan nő. Ezt a feszültséget nevezzük a dióda nyitófeszültségének. A nyitófeszültséghez egzakt módon természetesen egy áramérték is tartozik, ennek értéke függhet a dióda adatlapjától, felhasználási körétől (jellegzetesen néhány mA vagy ennél nagyobb érték).



8–3. ábra. Ideális dióda karakterisztikája

A Si dióda nyitófeszültsége általában 0.6 V – 0.7 V tartományban található technológiai paraméterektől függően. Egyéb típusú diódák esetén a nyitófeszültségek ettől eltérhetnek. Schottky-diódák esetén a nyitófeszültség ennél kisebb, 100 mV – 400 mV tartományban található. LED-ek esetén a nyitófeszültség értéke ennél magasabb: körülbelül 1.5 V vagy (főleg nagyfényű LED-ek esetén) ennél jóval nagyobb érték is lehet. Fontos viszont, hogy a hőmérséklet vagy gyártási szórás miatt akár néhány 100 mV-os eltérések is lehetnek.

Másodlagos jelenségek

A dióda ideális karakterisztikáját több másodlagos jelenség is befolyásolja. Ezek közül kiemelhetjük a következőket:

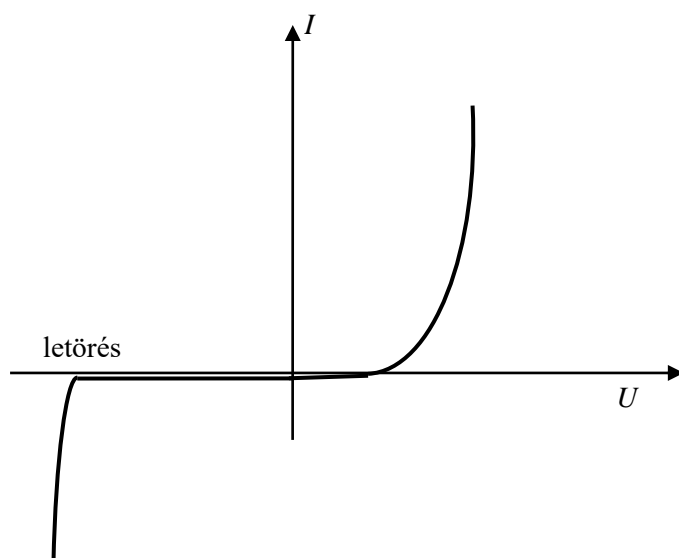
- soros ellenállás,
- megnövekedett záró irányú áram,
- letörés.

Egyik a dióda soros ellenállása, amit legegyszerűbben a következő alakban lehet matematikailag leírni:

$$U(I) = mU_T \left[\ln \left(\frac{I}{I_{S0}} + 1 \right) \right] + R_s I \quad (8-5)$$

A dióda soros ellenállása azt okozza, hogy adott áram esetén nagyobb a feszültségesés a diódán, tehát a karakterisztika jobbra tolódik. A soros ellenállás hatása főleg nagyobb áramok esetén jelentős.

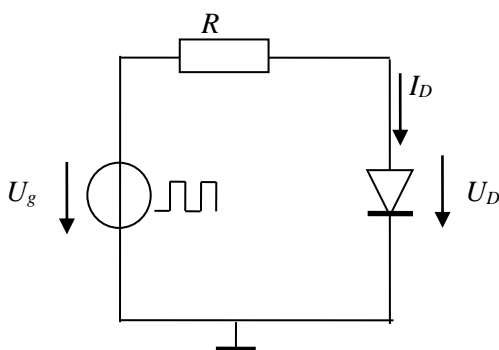
A valós karakterisztikának része az is, hogy nagy negatív feszültség esetén az áram hirtelen elkezd nőni. Ez a hirtelen letörés már általában nem üzemi tartomány (kivéve pl. a Zener-diódákat), és ezt elérve a dióda tönkremenetelét okozhatjuk.



8-4. ábra. Valós dióda karakterisztikája

Dióda tranziens viselkedése

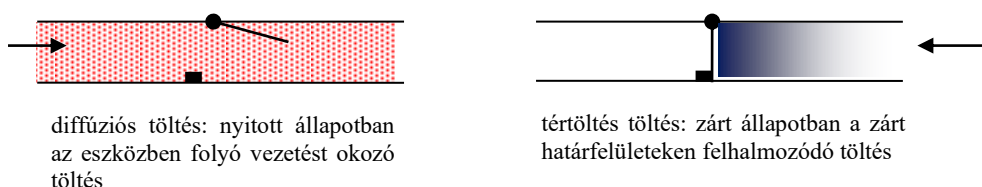
A dióda tranziens viselkedését a következő elvi elrendezésben vizsgáljuk:



8-5. ábra. Dióda tranziens vizsgálatához tartozó elvi kapcsolási rajz

A téma iránt részletesebben érdeklődők a honlapon, a méréshez tartozó Mellékletben találnak bővebb leírást, de a következőkben egy egyszerűsített kép alapján is szemléltetésre kerülnek a kapcsolás során fellépő jelenségek. Megjegyezzük, hogy az egyszerűsített kép inkább szemléletformáló, nem ír le minden jelenséget helyesen.

Nézzük a 8-6. ábrát! Ezen a diódát mint egy csővezetéknek tekintjük, amelynek a közepén egy csapóajtó biztosítja a benne áramló közeg (pl. összenyomható gáz) egyirányú áramlását. Az anyagi részecskék a töltéshordozóknak, ezek áramlása a villamos áramnak, a nyomás pedig a feszültségnek feleltethető meg villamos szempontból.



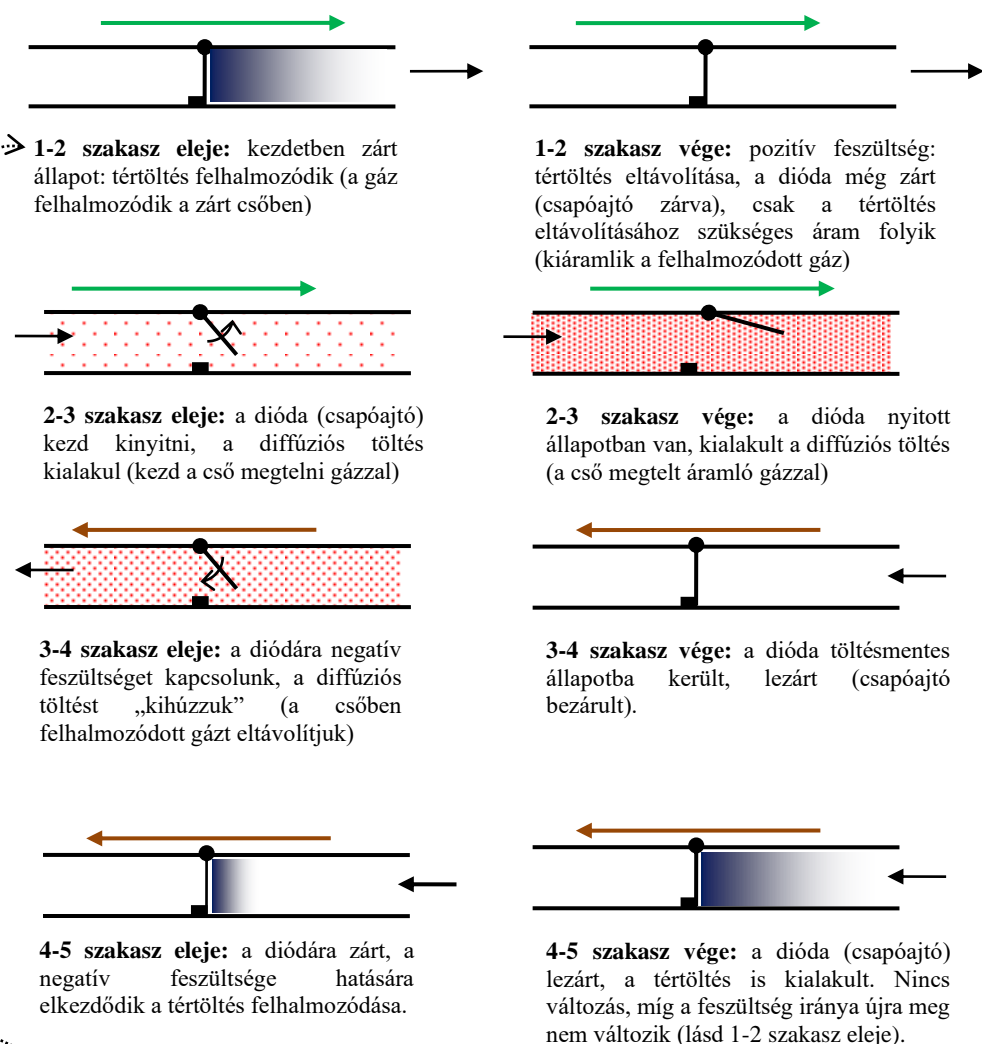
8–6. ábra. Dióda egyszerű modellje kapcsolási jelenségek megértéséhez.

A dióda nyitott és zárt állapotában különböző töltések halmozódnak fel az eszközben. Gyors kapcsolás során nem tekinthetünk el ezektől a töltésektől, ugyanis ezek felhalmozásához és eltávolításához időre van szükség, ami a kapcsolási folyamatot lassítja. Két töltéstípust különböztetünk meg

- *diffúziós töltés*: ez a töltés lényegében a vezetés során éppen a diódában található, az áramvezetést lehetővé tévő töltésnek felelnek meg. Minél nagyobb az átfolyó nyitó irányú áram, annál nagyobb a diffúziós töltés mennyisége. (Tekinthetünk ezekre a töltésekre úgy, mintha a dióda egy nyitott csővezeték lenne, és a diffúziós töltés az éppen benne áramló gáz mennyisége; lásd 8–6. ábra bal oldala. Minél nagyobb mennyiségű gáz áramlik adott idő alatt, értelemszerűen annál nagyobb mennyiség tartózkodik a csőszakaszban egy adott időpontban)
- *tértöltés*: ez a töltés a dióda zárt állapotában domináns. A dióda zárt állapotában a p-n réteg határfelület lényegében egy szigetelő réteggént funkcionál, ami két vezető réteget választ el, így lényegében egy kondenzátor alakul ki. A zárófeszültség növelésével tehát egyre nagyobb töltés halmozódik fel a határfelületen, ezt nevezzük tértöltésnek. Minél nagyobb a záró irányú feszültség, annál nagyobb a tértöltés. (Tekinthetünk ezekre a töltésekre úgy, mintha a dióda egy közepén zárt csővezeték lenne, és a tértöltés a zárt csőben növekvő nyomás hatására egyre inkább felhalmozódó gáz lenne, lásd 8–6. ábra jobb oldala).

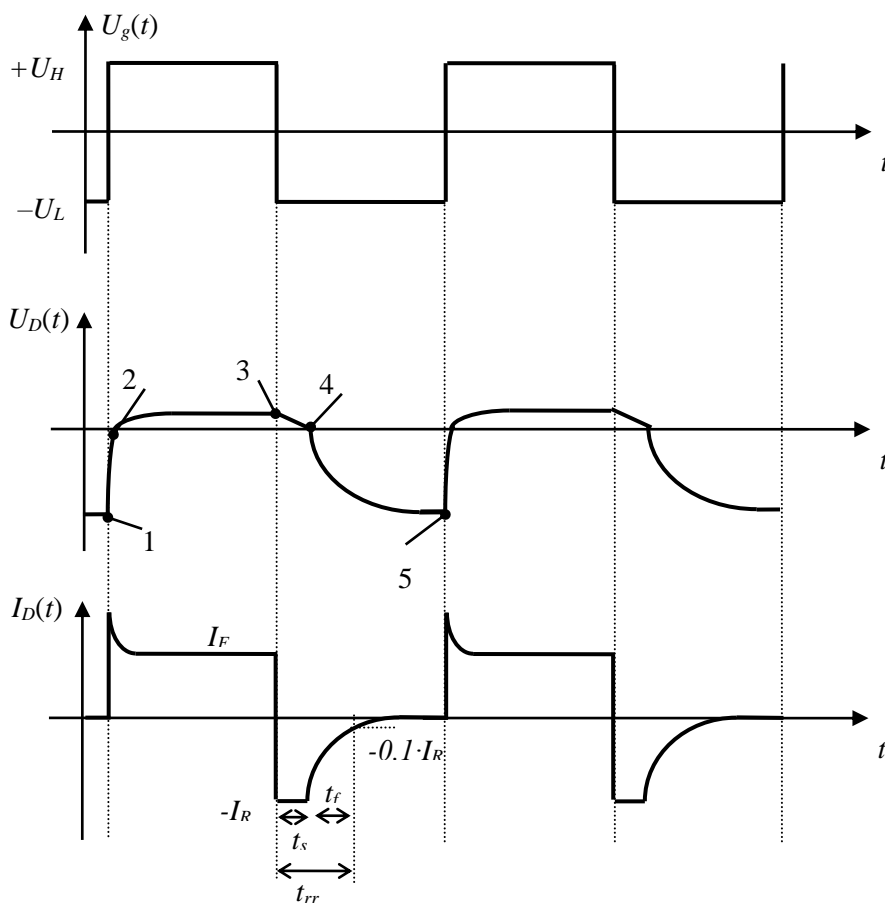
A fenti töltésfelhalmozódási (töltéstárolási) jelenségeket a diódával párhuzamosan kapcsolódó kapacitív tagokkal, tehát töltéstárolásra képes komponensekkel modellezzük. Meg kell jegyeznünk, hogy ezek a kapacitások nagyban nemlineáris függvényei a feszültségnek.

A kapcsolási körfolyamatot a 8–7. ábra illusztrálja a bemutatott csővezetékmodell felhasználva. Kezdetben a csővezetéken negatív irányú nyomás található, tehát a csapóajtó zárt, és töltés halmozódik fel a határfelületen (tértöltés). A nyomás aztán pozitív irányú lesz, és első ütemben eltávolítjuk a felhalmozódott tértöltést, majd ezután a csapóajtó (dióda) kinyit, és a cső megtelik gázzal (kialakul a diffúziós töltés). A vezető állapot végén a nyomásirány megfordul, és a csőben felhalmozódó gázt (diffúziós töltést) eltávolítja a negatív irányú nyomás (kihúzó feszültség). A csővezetékéből minden gázt eltávolítottunk, és a csapóajtó lezárul, majd elkezdődik a tértöltés felhalmozódása, tehát a körfolyamat indul az elejétől. A fenti modell nem írja le teljes pontossággal a dióda működését, de a főbb szakaszokat jól szemlélteti.



8–7. ábra. Dióda tranzien viselkedésének megértését segítő illusztráció

A következőkben megvizsgáljuk a dióda kapcsolási tranzienseit, a kapcsolás során kialakuló feszültség és áram jelalakokat. A 8–5. ábrán bemutatott áramkör gerjesztéseként négyszögjelet használunk, és figyeljük a dióda áramát és feszültségét. A jellegzetes jelalakok a 8–8. ábrán láthatók (az egyes szakaszoknál érdemes egyidejűleg a 8–7. ábrát is figyelni).



8–8. ábra. Dióda tranziens viselkedéséhez tartozó jelalakok

Feltételezzük, hogy a diódára kezdetben negatív záró irányú feszültséget kapcsolunk. A kapcsolási tranziens egyes szakaszaiban a következő folyamatok zajlanak le:

1-2. szakasz: A dióda zárt állapotában hirtelen pozitív nyitófeszültséget kapcsolunk. Először a zárt állapotban felhalmozódott tértöltést kell eltávolítani, tehát a tértöltéskapacitást negatív feszültségről nulla feszültségre feltölteni.

A szakasz kezdetén a dióda feszültsége (tértöltéskapacitás negatív feszültségre töltve):

$$U_{D1} = -U_L \quad (8-6)$$

A szakasz végén pedig (a tértöltéskapacitást 0 feszültségre töltöttük):

$$U_{D2} = 0 \quad (8-7)$$

Az áramok a következő módon alakulnak:

$$I_{D1} = \frac{U_H - (-U_L)}{R} = \frac{U_H + U_L}{R} \quad (8-8)$$

$$I_{D2} = \frac{U_H}{R} \quad (8-9)$$

2-3. szakasz: A dióda a szakasz elején feszültségmentes állapotból indul, és a szakasz végére eléri az állandósult állapotbeli nyitófeszültséget, tehát:

$$U_{D3} = U_F \quad (8-10)$$

ahol U_F a dióda nyitófeszültségét jelöli (forward voltage). Ebben a szakaszban ki kell alakítani a diffúziós töltést (az üres csővezeték megtelik gázzal).

Amennyiben a generátorfeszültségre igaz, hogy $U_H \gg U_F$, abban az esetben az áram közel állandó (a szakasz végére kismértékben csökkenő módon):

$$I_{D2,3} \approx \frac{U_H}{R} \quad (8-11)$$

egzaktul:

$$I_{D3} = \frac{U_H - U_F}{R} \quad (8-12)$$

3-4. szakasz: A diódára nyitott állapotban hirtelen $-U_L$ értékű negatív (záró irányú) feszültséget kapcsolunk. A dióda feszültsége a szakasz elején mérhető U_F értékről 0 V-ra csökken:

$$U_{D4} = 0V \quad (8-13)$$

Elegendően nagy negatív generátorfeszültség ($U_L \gg U_F$) esetén az áram:

$$I_{D3,4} = I_R \approx \frac{U_L}{R} \quad (8-14)$$

Az I_R a záró irányú (reverse) úgynevezett kihúzó áram. A kihúzó áram ebben a szakaszban nagyjából állandó értékű, hiszen a diódában még megtalálható a nyitáshoz szükséges diffúziós töltés.

4-5. szakasz: A dióda zárt állapotba kerül, és feszültsége egyre megközelíti a negatív U_L generátorfeszültséget:

$$U_{D5} = -U_L \quad (8-15)$$

A kihúzóáram is csökken, és egyrészt a maradék diffúziós töltés kihúzására fordítódik, másrészt a tértöltéskapacitást (p-n-átmenet kiürített rétege) tölti a generátor negatív feszültségére, majd nullává válik (pontosabban az elhanyagolható mértékű záró irányú árammal egyezik meg):

$$I_{D4} = I_R \approx \frac{U_L}{R}$$

$$I_{D5} \approx 0$$

A kapcsolási folyamat összefoglalva a következő módon zajlik. A be- és kikapcsolási szakaszokban fel kell építeni a megfelelő töltésképet. Bekapcsoláskor a kiürített réteg tértöltését kell feltölteni és kiépíteni a diffúziós töltést, kikapcsoláskor pedig a diffúziós töltést el kell távolítani, és a kiürített rétegből kell a töltéseket eltávolítani. Ezen folyamatok során a dióda kapacitív jellegű eszközként viselkedik, és a generátor által szolgáltatott áram a be- és kikapcsolási szakaszokban ezen töltések pótlására/eltávolítására szolgál.

A kapcsolási folyamattal kapcsolatos fontos következtetések:

- A a felhalmozódó diffúziós töltés arányos a nyitó irányú árammal, tehát minél nagyobb a nyitó irányú áram (nyitó irányú generátorfeszültség), annál nagyobb a felhalmozódó diffúziós töltés.
- Minél nagyobb a kihúzóáram (záró irányú generátorfeszültség), annál gyorsabban eltávolítható a diódából a felhalmozódó diffúziós töltés, tehát annál hamarabb zárt állapotba kényszeríthető a dióda.

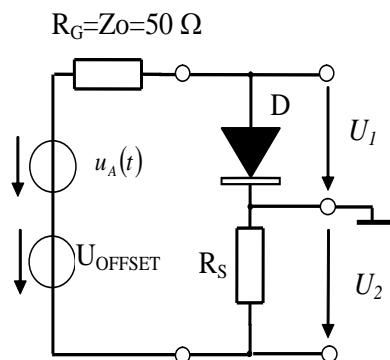
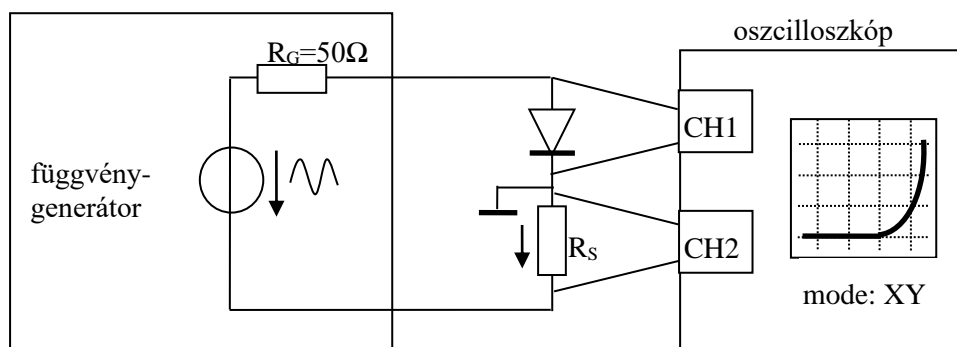
A fenti két megállapításnak megfelelően első közelítésben a nyitó és záró irányú (kihúzó) áram $\frac{I_F}{I_R}$ aránya határozza meg a kikapcsolási tranziens hosszát. Minél nagyobb ez az arány, annál hosszabb a tárolási idő. Sokszor a nyitó irányú áram konstrukciósan adott, tehát a kikapcsolási időt a kihúzó áram növelésével csökkenthetjük. Tehát:

- Nagyobb nyitó irányú áram nagyobb diffúziós töltést hoz létre, tehát adott kihúzóáram mellett minél nagyobb volt a nyitó irányú áram, annál nagyobb a záró irányú feléledési idő.
- Nagyobb kihúzóáram adott nyitó irányú áram mellett gyorsabban eltávolítja a felhalmozódott diffúziós töltést, tehát csökken a záró irányú feléledési idő.

Dióda statikus karakterisztikájának mérése

A mérési elrendezést a 8–9. ábra, a mérőpanel beállításait a 8–10. ábra mutatja. Mivel a karakterisztikát oszcilloszkópon szeretnénk megjeleníteni, ami alapvetően feszültség mérést teszi lehetővé, így a dióda áramának mérését feszültségmérésre vezetjük vissza: egy diódával sorosan kapcsolt $R_S=10\ \Omega$ -os ellenálláson eső feszültséget mérjük, és abból számítjuk vissza a rajta átfolyó áramot:

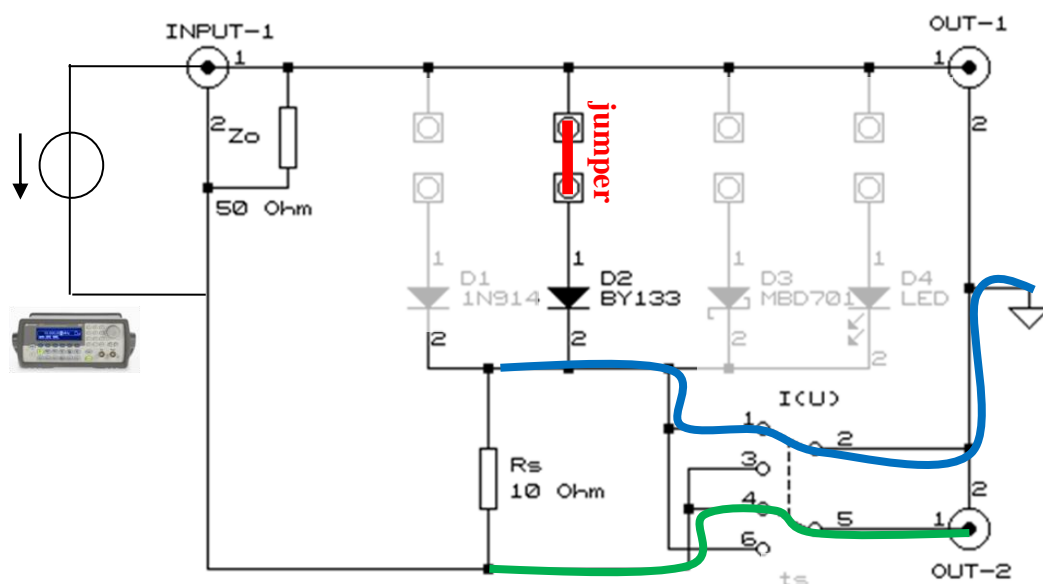
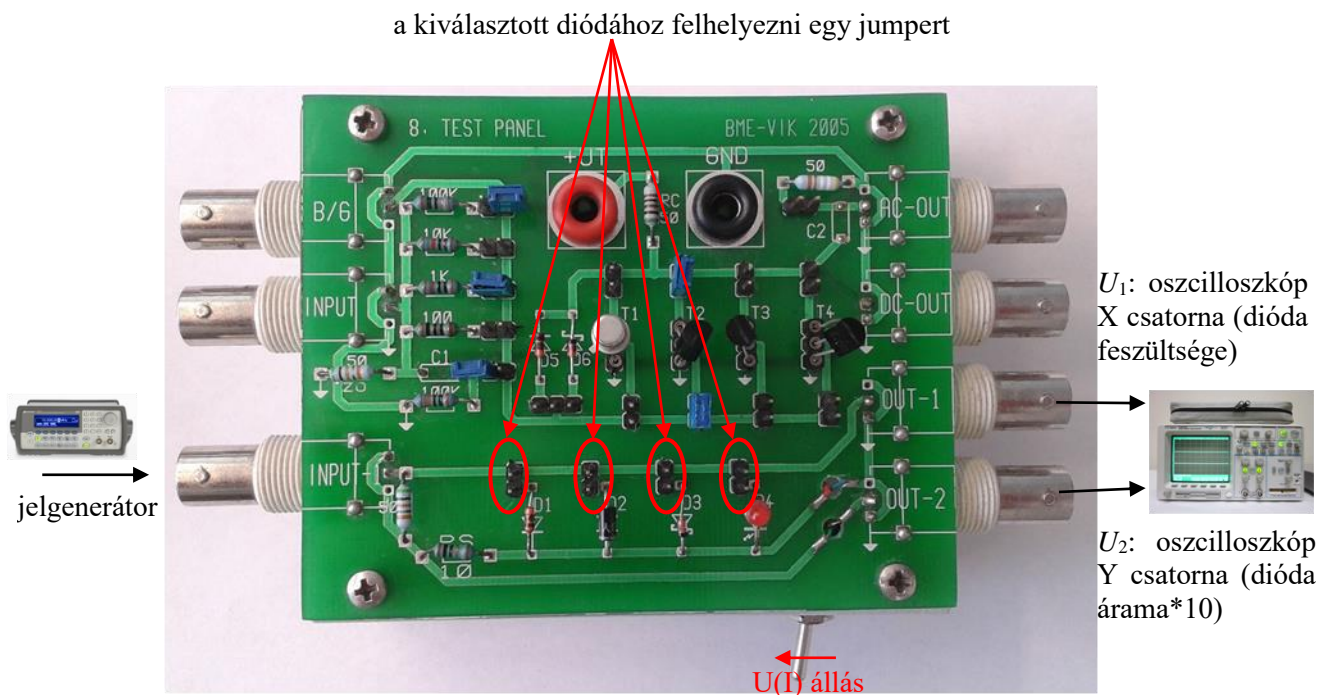
$$I_D = \frac{U_2}{R_S} = \frac{U_2}{10\ \Omega} \quad (8-16)$$



$$u_A(t) = U_A \sin(\omega t)$$

$$0 \leq U_{OFFSET} \leq 5V$$

8–9. ábra. Dióda statikus karakterisztikájának mérésére szolgáló elrendezés és kapcsolási rajz



8–10. ábra. Tesztpanel használata statikus karakterisztika mérés közben.
 Alsó ábra: kapcsoló $U(I)$ állásában az áramutak jelölése, BY133-as dióda jumperrel kiválasztva, nem használt alkatrészek kiszűrve.

A karakterisztikát oszcilloszkóp segítségével ábrázoljuk az oszcilloszkóp X-Y megjelenítési módjának felhasználásával (a megjelenítő X tengelye a CH1 csatorna, az Y tengely a CH2 csatorna). Ahhoz, hogy az X tengely a feszültség, az Y tengely a dióda árama legyen az ábrának megfelelő kapcsolást kell kialakítani.

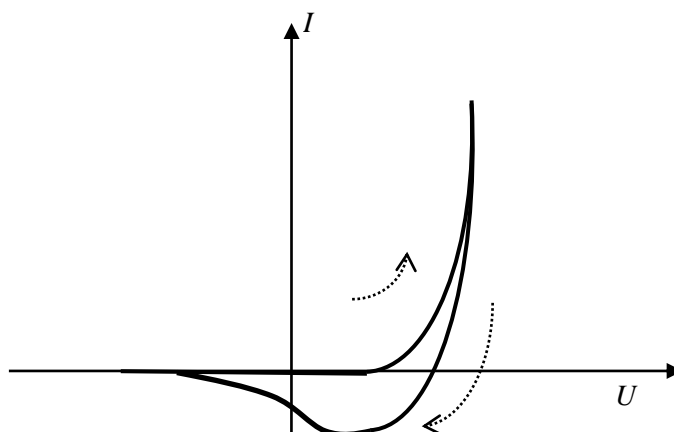
Figyelem! A kapcsolás kialakításakor kihasználtuk, hogy a rendelkezésre álló generátorok képesek kis frekvencián földfüggetlen kimenetet szolgáltatni. Ez általánosságban nem biztos, hogy minden műszer esetén érvényes. Ennek köszönhetően lehetséges a mérési elrendezésben a dióda és az R_s mérőellenállás közös pontját földelni, így külön mérhető az áram és feszültség is. A mérőpanelen a földpont a kábelek egyszerű csatlakoztatásával nem választható meg, ahhoz a panel oldalán található kapcsolót kell megfelelő állásba állítani (lásd: 8-1 és 8-2 ábrák). A 8-10. ábra alsó részén látható bejelölve, hogy a kapcsoló U(I) állásában a föld pontot a dióda és árammérő ellenállás közös pontjára (kék vonal), az OUT-2 kimenetet pedig az árammérő ellenállás negatív pontjára kötjük (zöld vonal).

Az oszcilloszkóp lehetővé teszi az egyes csatornák skálázását, ennek megfelelően a CH2-es csatornát úgy kell beállítani, hogy a mért feszültség 10-ed részét jelenítse meg, és a dimenziót célszerű áram [A] dimenzióra állítani. Fontos még továbbá, hogy mivel a CH2 csatorna a referenciairánnyal ellentétes előjelű feszültséget mér, így az invertálás funkciót is be kell kapcsolni mérés közben.

Gerjesztő jelként bármilyen olyan jelet választhatunk, amely folytonos, nem tartalmaz nagy ugrásokat, és képes letapogatni a megfelelő bemeneti feszültségtartományt (pl. háromszög-, szinuszos jel megfelelő, de fűrész- vagy négyszögjel nem jó!). Ezen a mérésen szinuszos gerjesztést alkalmazunk erre a célra. Ne tévesszen meg senkit, hogy szinuszos jellel általában lineáris rendszerek átvitelét szokás mérni, ebben az esetben most statikus transzferkarakterisztikát mérünk.

A gerjesztő jel alacsony és magas szintjét úgy kell megválasztani, hogy képes legyen letapogatni a számunkra szükséges feszültségtartományt, tehát a magas szintnek el kell érnie a dióda nyitófeszültségét, az alacsony feszültségnek pedig zárt állapotba kell vezérelni a diódát. A panelen egy $50\ \Omega$ -os bemeneti lezáró ellenállás is található, így a generátort érdemes $50\ \Omega$ -os bemeneti ellenálláshoz illeszteni (Utility \rightarrow Output setup \rightarrow $50\ \Omega$ load).

A gerjesztő jel frekvenciáját úgy kell megválasztani statikus karakterisztika mérésekor, hogy a tranziens tulajdonságok még ne jelenjenek meg a karakterisztikán. Túl nagy frekvencia esetén már a dióda kapacitív tagjai is érzékelhetővé válnak. A lefutó ág esetén ekkor akár mérhető nagyságú negatív irányú kihúzó áramok is folyhatnak, ami a karakterisztika 8-11. ábrán látható hurkolódásához vezet.



8–11. ábra. Dióda karakterisztikájának hurkolódása túl nagy frekvenciájú gerjesztő jel esetén.

Mérés során négy féle dióda karakterisztikáját mérjük: nagyáramú Si dióda, kisáramú Si dióda, Schottky-dióda, LED. Az aktuálisan mérendő diódát a panelen található jumperek segítségével választhatjuk ki (lásd 8–1 és 8–2. ábrák).

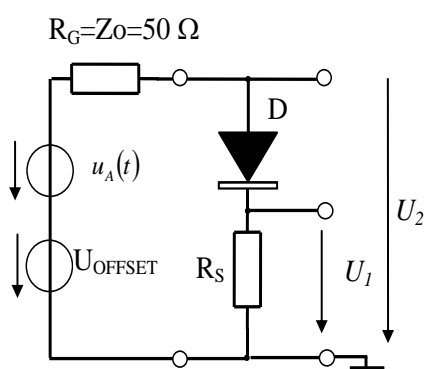
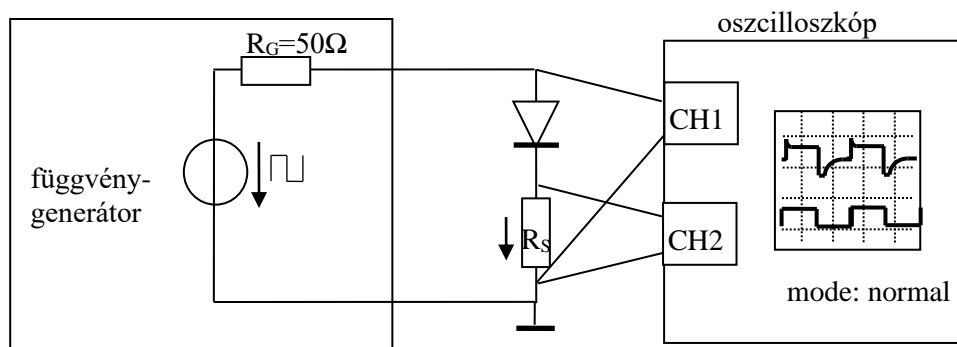
Dióda kapcsolási idejének mérése

A dióda tranziens viselkedésének mérésére szolgáló elrendezés a földelési pont kivételével megegyezik a statikus karakterisztika méréséhez használt kapcsolással, lásd a 8–12. és 8–13 ábrákat. Mivel a méréshez használt gerjesztő jel frekvenciákon a generátor tapasztalatok szerint nem tekinthető földfüggetlen táplálásnak, így mind a generátor negatív kimenetét mind az oszcilloszkóp bemeneteinek földpontját egyazon pontra kell csatlakoztatni.

A statikus karakterisztika és tranziens tulajdonságok méréséhez nem kell átalakítani az elrendezést, a földpontok megcseréléséhez a *tesztpanel oldalsó részén található kapcsolót kell megfelelő pozícióba állítani* (8–2. ábra). Az oszcilloszkópon a 2-es csatorna *invertálását ki kell kapcsolni*. A 8–13. ábra alsó részén látható módon a panel alján található kapcsoló ts állásában az Rs árammérő ellenállás alsó pontját leföldeljük (kék vonal) a dióda és az ellenállás közös pontját kivezetjük az OUT-2 kimenetre (vesd össze a 8–10. ábrával).

Figyelem! Ebben az esetben a CH1 csatornán nem a dióda feszültségét, hanem a diódán és az árammérő ellenálláson eső feszültség összegét mérjük! Mérés során főleg az áram jelalakját vizsgáljuk, így ez nem okoz problémát. A dióda feszültségének ábrázolásához az 1-es és 2-es csatorna különbségét kell MATH módban megjeleníteni.

Mérés során a gerjesztő jel felfutó élének meredekségét 100 ns-re korlátozzuk, hogy a meredek élváltás és a hozzávezetések parazita induktivitása/kapacitása miatti tranziensek ne zavarják a mérést. Ennek megfelelően a jelgenerátort pulse üzemmódban kell használni (nem pedig négyszögjel), mert itt lehet csak a felfutó él meredekségét korlátozni.

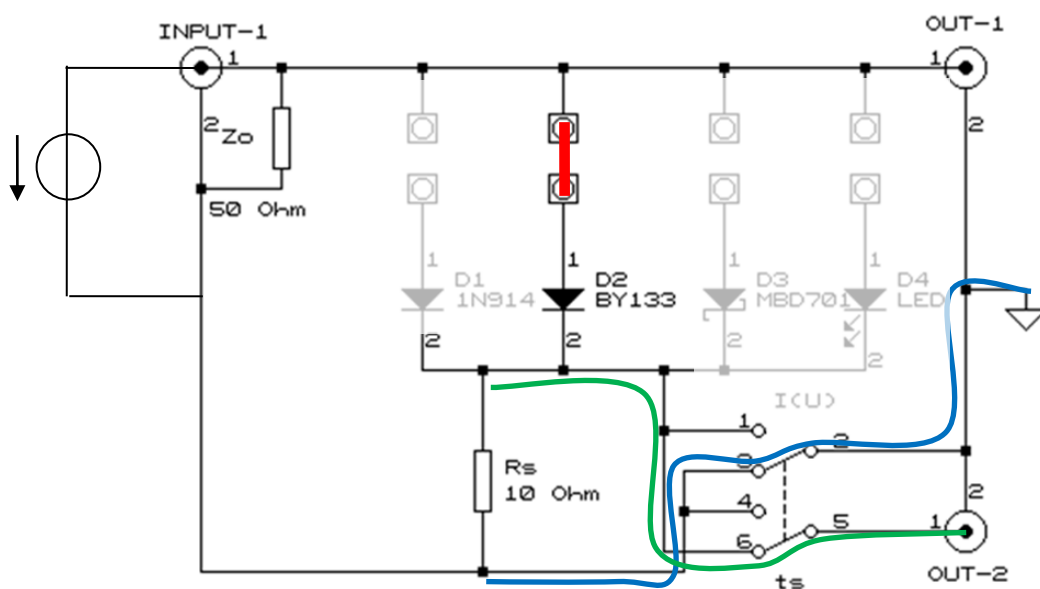
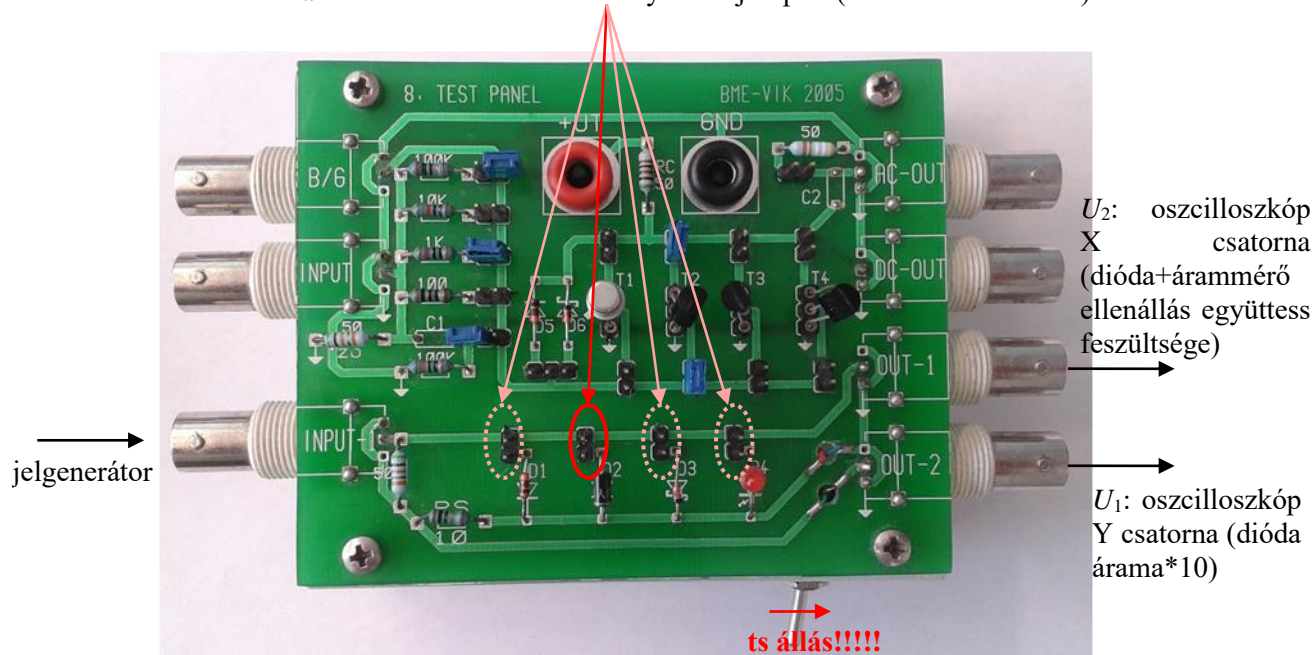


$$u_A(t) = U_A \text{sqwr}(\omega t)$$

$$0 \leq U_{\text{OFFSET}} \leq 5V$$

8–12. ábra. Dióda tranziens viselkedésének mérésére szolgáló elrendezés és kapcsolási rajz

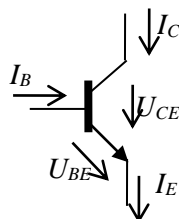
a kiválasztott diódához felhelyezni a jumpert (**D2-t** érdemes mérni)



8–13. ábra. Tesztpanel használata dinamikus viselkedés mérés közben.
 Alsó ábra: kapcsoló ts állásában az áramutak jelölése, BY133-as dióda jumperrel kiválasztva, nem használt alkatrészek kiszürkítve.

Tranzisztor paramétereinek mérése

Tranzisztor nagyjelű viselkedését leíró egyenletei és karakterisztikái



8–14. ábra. Tranzisztor rajzjele, illetve jellemzésére tipikusan használt feszültségek és áramok jelölései

A tranzisztor nagyjelű működését ideális esetben az Ebers–Moll-modell határozza meg. Esetünkben a következő megállapítások

Az emitteráram a bázis-emitter p-n átmenetnek megfelelően alakul:

$$I_E(U_{BE}) = I_{S0} \left(\exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) - 1 \right) \quad (8-17)$$

A diódánál leírtak alapján Si tranzisztor esetén első közelítésben a bázis-emitter feszültség nagyjelű működés szempontjából konstansnak tekinthető: $U_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$.

A kollektoráram az úgynevezett áramerősítési tényezővel (B) arányos módon követi a bázisáram értékét:

$$I_C = B \cdot I_B \quad (8-18)$$

Az emitteráram pedig a bázis- és kollektoráram összege:

$$I_E = I_C + I_B \quad (8-19)$$

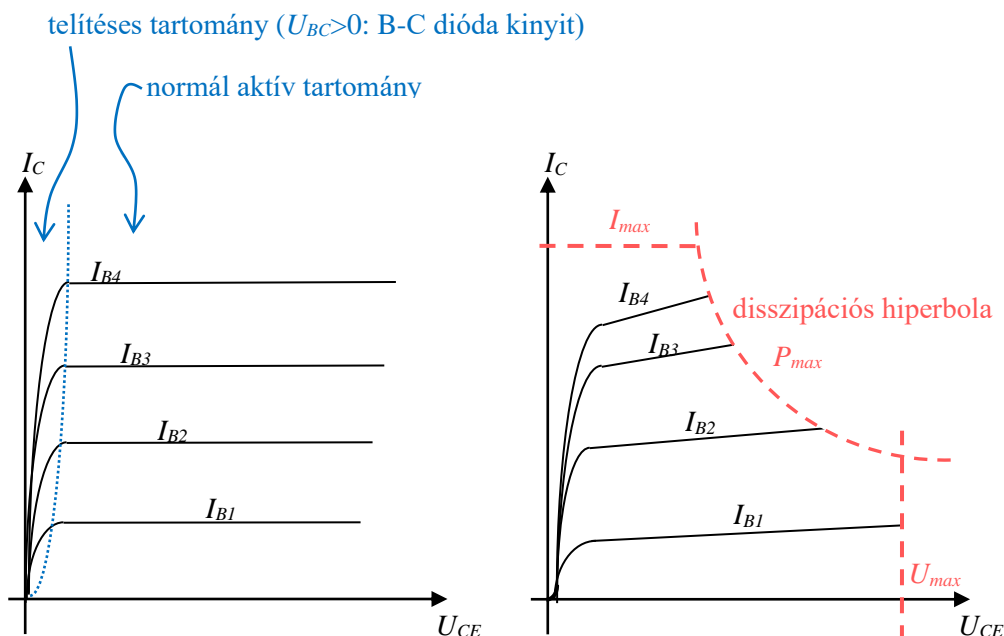
illetve az eddigi eredményeket összegezve:

$$I_E = (B + 1)I_B \quad (8-20)$$

A fenti egyenletek mindaddig igazak, amíg a tranzisztor úgynevezett *normál aktív* tartományban üzemel, tehát a bázis-kollektor p-n átmenet nem nyitott ki.

Azt a tartományt, amikor a bázis-kollektor p-n átmenet nyitó irányba van előfeszítve ($U_{BC} > 0$) *telítési tartománynak* nevezzük. Ekkor a bázisáramhoz már hozzájárul a bázis-kollektor átmenet árama is.

A tranzisztorok jellemzésének egyik leggyakoribb módja a kimeneti karakterisztikáknak a megadása (lásd a 8–15. ábra). A kimeneti karakterisztika egy olyan görbesereg, ami a kollektoráramnak kollektor-emitter feszültségtől való függését mutatja: $I_C(U_{CE})$. A görbesereg általában a bázisárammal szerint van paraméterezve ($I_{B1}, I_{B2} \dots$).



8–15. ábra. Tranzisztor kimeneti karakterisztikái: bal oldal ideális esetben, jobb oldal valós esetben

A karakterisztikákon kék pontozott vonal mutatja a telítés határát.

Habár nem része a karakterisztikának, de piros szaggatott vonallal feltüntettük az úgynevezett disszipációs hiperbolát, és a maximálisan megengedett feszültséget és áramot is, amelyek a tranzisztorok tipikus határadatai. A disszipációs hiperbola, I_{max} és U_{max} behatárolják azt a területet, amin belül az eszközt meghibásodás (pl. disszipáció miatti túlmelegedés, átütés) nélkül lehet üzemeltetni. Ezen biztonságos terület az úgynevezett Safe Operation Area (SOA). A maximális áram és feszültség jelölése viszonylag egyértelmű, kis magyarázatot a disszipációs hiperbola igényel. Legyen a maximális disszipáció P_{max} . A tranzisztor disszipációját a minimális bázisáram miatt főleg a kollektor-emitter átmeneten disszipált teljesítmény adja, amire igaznak kell lennie, hogy:

$$U_{CE} \cdot I_C \leq P_{max} \rightarrow I_C \leq \frac{P_{max}}{U_{CE}} \quad (8-21)$$

Látható, hogy az a terület, ahol az eszköz disszipációja kisebb, mint a megengedett, valóban egy $\frac{1}{x}$ jellegű hiperbola.

A maximális disszipáción kívül határadatként tehát általában szerepel az I_{Cmax} , U_{CEmax} , bázis-emitter maximális záró irányú feszültség, maximális/minimális hőmérséklet ...

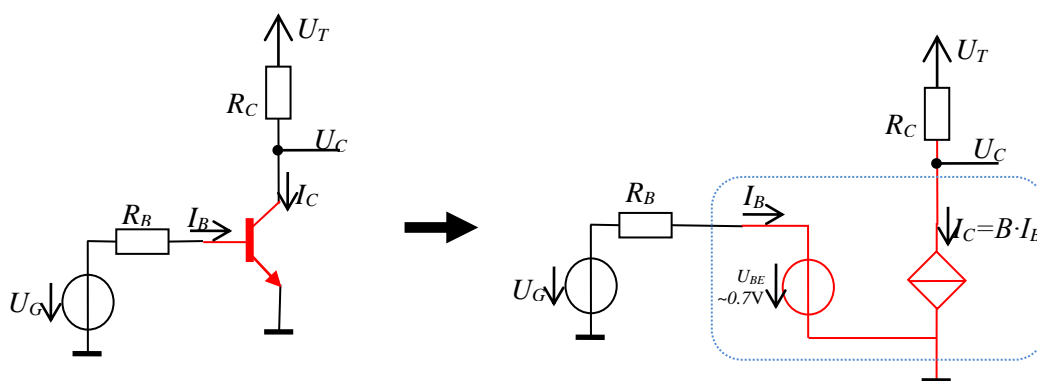
A valós karakterisztika a következő főbb pontokban tér el az ideálistól:

- A kimeneti görbék normál aktív tartományban nem vízszintesek. Ennek oka, hogy a kimeneti vezetés nem nulla, a feszültség növelésével nő a kimeneti áram. A karakterisztika meredeksége adja a kimeneti vezetésként. A kimeneti vezetés értéke általában legalább több tíz vagy száz $k\Omega$ (néhány μS).

- Még ha a paraméterként megadott bázisáramok egyenletesen változnak is, a karakterisztikák távolsága nem egyenletes. Ennek oka, hogy a B áramerősítési tényező függ a kollektoráramtól.

Tranzisztor munkaponti beállítása

A munkapont beállításához tartozó vizsgálatokat a 8–16. ábra alapján végezzük. Az ábrán látható a munkapontszámításhoz használt egyszerű nagyjelű helyettesítő kép. A helyettesítő képen a bázis-emitter átmenetet egy U_{BE} feszültségforrással vesszük figyelembe (értéke tipikusan 0.7 V szobahőmérsékleten), illetve a kollektoráram a bázisáram B -szerese.



8–16. ábra. A tranzisztor munkaponti beállítása, és a munkapontszámításhoz használt nagyjelű helyettesítő kép

A rendszeregyenletek:

$$I_B = \frac{U_G - U_{BE}}{R_B} \quad (8-22)$$

$$I_C = B \cdot I_B \quad (8-23)$$

$$U_C = U_T - R_C \cdot I_C \quad (8-24)$$

A tranzisztor normál aktív tartományban működik mindaddig, amíg a kollektorpotenciál nagyobb a bázispotenciálnál. Ennek megfelelően a telítés határán $U_C = U_{BE}$, tehát:

$$I_{C,lim} = \frac{U_T - U_{BE}}{R_C} < \frac{U_T}{R_C} \quad (8-25)$$

Az ehhez tartozó bázisáram és generátorfeszültség:

$$I_{B,lim} = \frac{I_{C,lim}}{B} \quad (8-26)$$

$$U_{G,lim} = I_{B,lim} R_B + U_{BE} \quad (8-27)$$

Lineáris üzemmód esetén (normál aktív tartomány) a generátorfeszültség általában felbontható két komponensre:

$$U_G(t) = U_{G0} + u_G(t) \quad (8-28)$$

ahol U_{G0} a munkapontbeállításért felelős egyenkomponens, az $u_G(t)$ pedig az erősítendő váltókomponens.

Tranzisztor munkaponti beállításának és telítési pontjának mérése

A méréshez tartozó elvi kapcsolási rajzot és a mérőpanellal kialakítandó elrendezést a 8–17. és 8–18 ábra mutatja.

A panelnek ebben az esetben külső tápfeszültség szükséges. A beállítandó tápfeszültség 5 V, amelyet a külső labortápegység szolgáltat. Az összeállításban szükséges a kollektoráram mérése, amely a tápegységgel sorba kapcsolt digitális multiméterrel történik.

A gerjesztő jelet a panel bal oldalán található felső INPUT jelzésű bemenetre csatlakoztatjuk. Figyelem! A panel bemenetén 50 Ω -os lezárás található, tehát a bemenetre kapcsolt jelgenerátort 50 Ω -os terhelésnek megfelelően kell konfigurálni (Utility \rightarrow Output setup \rightarrow 50 Ω load), ellenkező esetben manuálisan kell kettővel szorozni a megadott feszültségeket. A bemenő feszültség mérése egy T-csatlakozó segítségével lehetséges. A panel lehetőséget biztosít a bázis-emitter feszültség visszamérésére a B/G kimeneten.

A panelen a tranzisztorokat jumperek segítségével lehet kiválasztani (két jumper). A bázisellenállás is konfigurálható egy jumper segítségével 100 Ω ... 100 k Ω tartományban (a méréshez 1 k Ω -ot használunk). A tranzisztor kollektorfeszültségét DC és AC csatoltan is meg lehet mérni a DC-OUT és AC-OUT kimeneteken.

Áramerősítés mérése

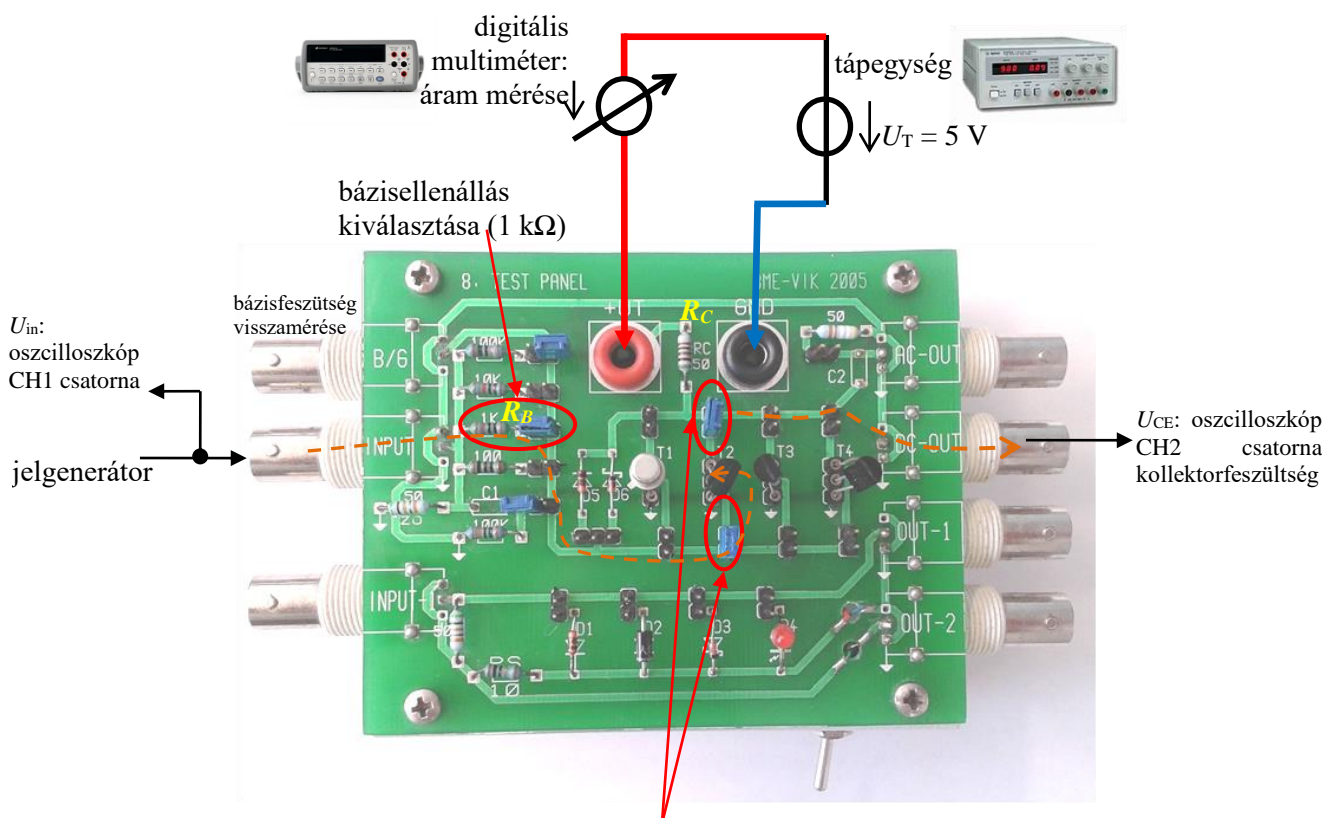
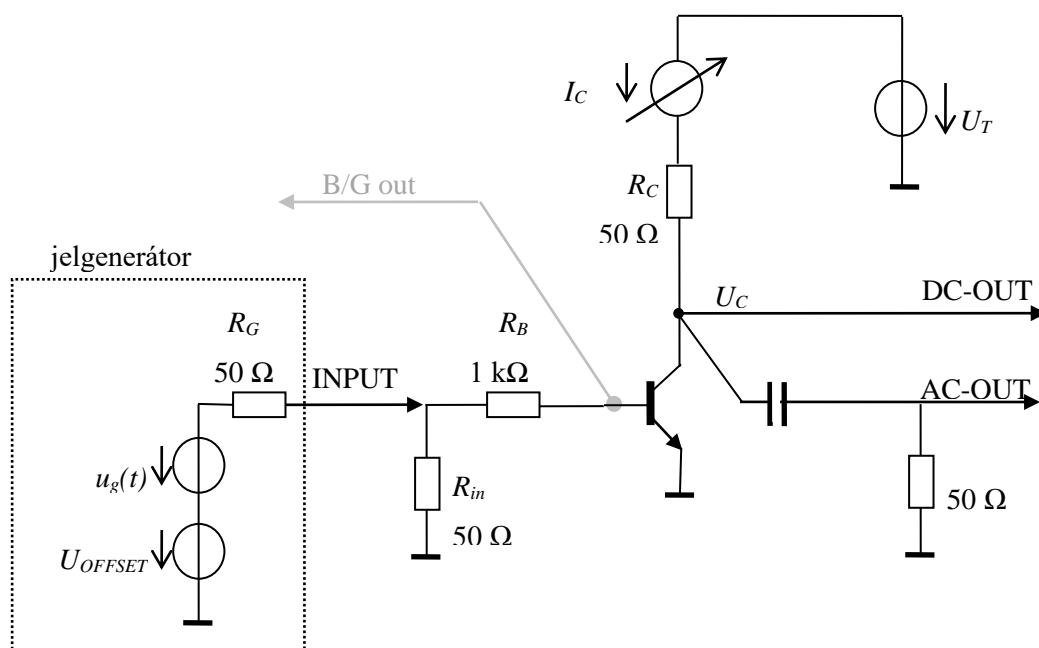
A mérés első részében a B áramerősítési tényező meghatározása történik. A mérést BC639-es tranzisztorral végezzük, mert ez a típus képes a megfelelő áram kapcsolására a paramétereit észrevehető romlása nélkül. A mérés során a panel bemenetére kapcsolt jelgenerátoron a DC feszültséget olyan feszültség szintre kapcsoljuk, ahol a tranzisztort még nem vezéreljük telítésbe (1 V...1.5 V). Ekkor a következő képlettel számoljuk a bázisáramot:

$$I_B = \frac{U_{in} - U_{BE}}{R_B} \quad (8-29)$$

Az U_{BE} feszültség mérhető a B/G kimeneten vagy becsülhetjük a 0.7 V-os értékkel. Az I_C kollektoráram a multiméterrel mérhető, így az áramerősítés számítható:

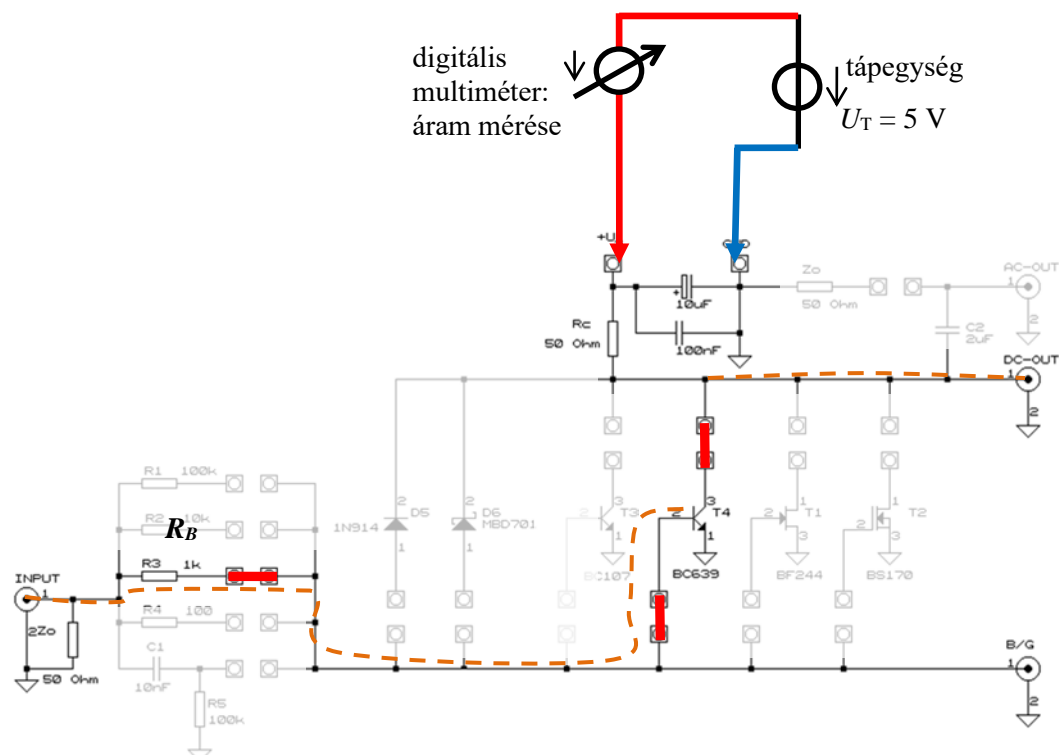
$$B = \frac{I_C}{I_B} \quad (8-30)$$

A jelgenerátoron sajnos az AC komponenst nem lehet teljesen letiltani. Ennél a mérésnél írjunk be 0 V-ot, és automatikusan beáll a legkisebb értékre, de ez a mérést nem zavarja.



a kiválasztott tranzistorhoz fel kell helyezni a jumpereket (**T2**-t kell mérni)

8–17. ábra. Tesztpanel használata tranzistor mérése közben. Fölül: elvi kapcsolási rajz, alul: mérőpanel rajza jelölve a kapcsolódási pontokat



8–18. ábra. Tesztpanel konfigurálása (kapcsolási rajzon). Jumperekkel kiválasztott konfiguráció: $R_B = 1\text{ k}\Omega$ -os ellenállás, BC639-es tranzisztor. Az adott konfigurációban nem használt alkatrészek kiszűrítve láthatók. A $10\text{ }\mu\text{F}$ és 100 nF -os kondenzátorok a tápfeszültség szűrését látják el, a mérésben nincsen aktív szerepük.

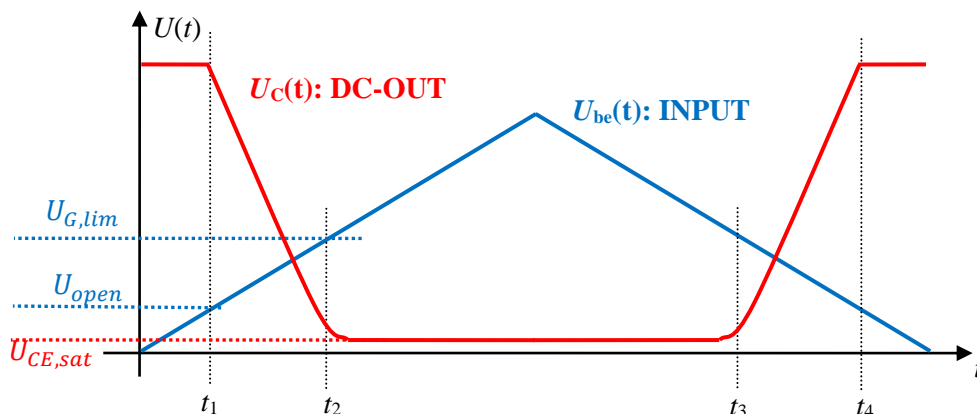
Telítési pont és kapcsolási karakterisztika mérése

A tranzisztort telítésbe vivő U_{Glim} bemeneti feszültséget a (8-27) és azt megelőző két képlet alapján számíthatjuk. A tápfeszültség 5 V, a kollektorellenállás $R_C = 50 \Omega$ és a bázisellenállás $R_B = 1 k\Omega$. A bázis-emitter feszültség 0.7 V-nak tekinthető.

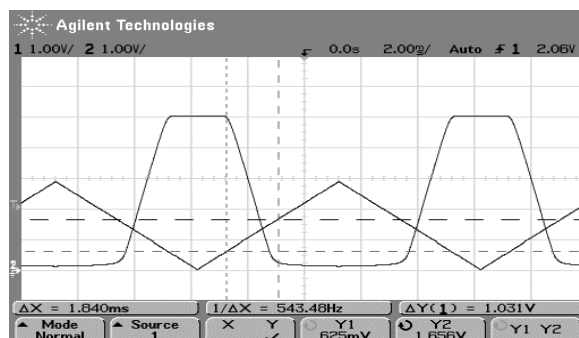
A mérés során a bemenetre háromszögjelet kapcsolunk, amely „letapogatja” a teljes bemeneti jeltartományt (megjegyezzük, hogy bármilyen folytonos jel megfelelne, pl. szinuszjel). A frekvenciát úgy kell megválasztani, hogy a tranziens jelenségek ne fejtsek ki hatásokat; a mérésen válasszuk például 100 Hz-re. A gerjesztő jel alacsony szintje legyen 0 V, a magas szintje pedig akkora, hogy a tranzisztort biztosan telítésbe vezérelje (pl. 3 V).

A mérés során várt feszültség hullámformák a 8–19. ábrán láthatók. Kékkel a bemenetre kapcsolt háromszögjel, pirossal a kimeneten mért kollektorfeszültség látható. A nulla időpontból indulva a t_1 időpontban a bemeneti feszültség eléri a tranzisztor U_{open} nyitófeszültségét, és a bázison ezáltal pedig a kollektoron is áram folyik, és a kollektorellenálláson eső feszültség miatt a kollektorfeszültség elkezd csökkenni. A kollektoráram mindaddig nő nagyjából lineárisan (kollektorfeszültség csökken), amíg a tranzisztor telítésbe nem megy (lásd: t_2 időpont): ekkor éri el a bemeneti feszültség a (8-27) egyenlettel számított $U_{G,lim}$ feszültséget. A tranzisztor ekkor kikerül a normál aktív tartományból, a bázis-kollektor dióda kinyit. Ezután a kollektor potenciál nem lineárisan ugyan, de kis mértékben tovább csökken míg az $U_{CE,sat}$ szaturációs (telítési) feszültségen állandósul. A bementi jel a csúcserték elérését követően csökkenni kezd, és a t_3 -al jelölt időpontban a tranzisztor kikerül a telítési tartományból a t_4 -el jelölt időpontban pedig lezár.

A 8–20. ábra egy valós mérési eredményt mutat, ahol jól azonosíthatók a leírt jelenségek.



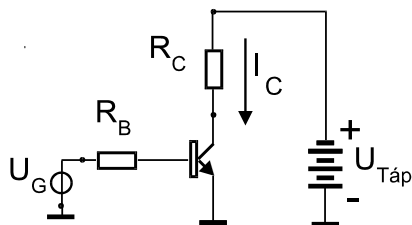
8–19. ábra. Tranzisztor kapcsolási karakterisztika mérés jelalak. Kék: gerjesztő jel, piros: kollektorfeszültség.



8–20. ábra. Tranzisztor kapcsolási karakterisztika (valós mérés).

Ellenőrző kérdések

1. Rajzolja fel egy tetszőlegesen kiválasztott méréshez tartozó blokkdiagramot!
2. Rajzolja fel egy dióda $U_D - I_D$ nyitó karakterisztikáját!
3. Írja fel az „ideális dióda” karakterisztika-egyenletét! A valóságos diódáknál milyen egyéb hatásokat kell még figyelembe venni?
4. Mit tapasztalunk a dióda statikus karakterisztikájának mérésekor ha a gerjesztő jel frekvenciáját növeljük? Miért?
5. Mi okozza a bipoláris félvezető eszközöknél jelentkező tárolási idő jelenséget?
6. Ábrázolja egy ideális négyszögjellel meghajtott dióda áram és feszültség tranziensének időbeli lefutását és ugyanezen az ábrán definiálja a következőket: nyitó irányú áram (I_F), kihúzó áram (I_R), töltéstárolási idő (t_s), záró irányú feléledési idő (t_{rr}).
7. Ha növeljük a dióda bekapcsoláskor a nyitó irányú áramot, akkor:
 - a, diffúziós töltés: nő, csökken, vagy változatlan?
 - b, tértöltés töltés: nő, csökken, vagy változatlan?
 - c, záró irányú feléledési idő (adott kihúzó áram mellett): nő, csökken, vagy változatlan?
8. Ha növeljük a kihúzó áramot (adott előtétellenállás mellett a negatív feszültséget növeljük), akkor:
 - a, diffúziós töltés: nő, csökken, vagy változatlan?
 - b, tértöltés töltés: nő, csökken, vagy változatlan?
 - c, záró irányú feléledési idő (adott nyitó irányú áram mellett): nő, csökken, vagy változatlan?
9. Rajzolja fel egy bipoláris tranzisztor közös emitteres kimeneti karakterisztikáját és jelölje be a telítési és a normál aktív tartományokat!
10. Ismertesse a teljesítmény-félvezetők főbb határadatait!
11. Mi a disszipációs hiperbola?
12. Mit értünk a biztonságos működési terület (SOA, safe operating area) alatt?
13. Az alábbi kapcsolásban közelítően mennyi a maximális kollektoráram értéke (I_{CMax}), illetve mekkora (I_{Blim}) bázisáram szükséges ahhoz, hogy a tranzisztort a telítés határára vezéreljük?



14. Ábrázolja egy ideális négyszögjellel meghajtott bipoláris tranzisztor kollektoráram tranziensének időbeli lefutását és ugyanezen az ábrán definiálja a bipoláris tranzisztor kapcsolási tranziens időit: késleltetési idő (t_k), felfutási idő (t_f), tárolási idő (t_t), lefutási idő (t_l)! (IMSc: lásd kiegészítő anyag)
15. Ismertesse a gyorsító-kondenzátor hatását a kapcsolási időkre! (IMSc: lásd kiegészítő anyag)

16. Ismertesse a Schottky-diódás telítésgátlás hatását a kapcsolási időkre! (IMSc: lásd kiegészítő anyag)