

Díóður

Fríða Margrét Guðmundsdóttir
Hildur Björk Búadóttir

Rafeindatækni fastra efna
Einar Örn Sveinbjörnsson
14/11/25

1 Ágrip

Í þessari tilraun eru rannsakaðir mismunandi eiginleikar díóða með C-V mælingum, I-V mælingum og mælingum á viðbragðstíma. Niðurstöður fyrir C-V mælingar sýndu að $N_D = 1,39 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ fyrir BYS26-45 díóðuna og gegnumbrotpennan var um 40–50 V en fyrir díóðuna BZX55C13 var $N_D = 7,1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ og gegnumbrotpennan var um 15 V. Þetta sýnir að hærri íbótarstyrkur leiðir til lægri brotspennu. Fyrir díóðuna 1N4007 kom í ljós að dópunin eykst með dýpt sem er í samræmi við fræðilega eiginleika p-n skeytu. Úr I-V mælingum sýndu niðurstöður að hærri hnéspenna samsvarar stærra orkugeili. Ljósdíóður höfðu þá hæstu hnéspennuna og germaníum díóða þá lægstu. Að lokum sýndu mælingar á viðbragðstíma að liftími hola fyrir díóðuna 1N4007 var $\tau_p = 9,83 \mu\text{s}$. Díóðan BAT48 sýndi þó ekki neikvæðan straum við bakspennu og því ekki hægt að ákvarða liftíma holanna. Það staðfestir að díóður með styttí liftíma hafa hraðara viðbragð.

2 Inngangur

Díóður eru gerðar úr hálfleiðurum sem mynda p-n-skeytu. P-hlið díóðu hefur holur og n-hliðin rafeindir. Við tengingu n- og p-hliðar verður til svæði milli þeirra sem kallast berasnauðabil. Breidd þessa svæðis og hversu vel díóðan leiðir ræðst af íbótarstyrk hvorrar hliðar og spennunni sem sett er yfir skeytu.

Þegar díóðan er bakspennt þá víkkar berasnauðabilið. Fjarlægðin x táknað dýptina inn í n-hlið díóðunnar, mælda frá p-n skeytinu. Rýmdin, C , minnkar þegar berasnauðabilið stækkar. Samband rýmdar og dýptar er gefið með:

$$x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{C} \quad (1)$$

þar sem A er flatarmál pn-skeytis, ε_0 er rafsviðsstuðull tómarúms og ε_r er hlutfallslegur rafsvörunarstuðull efnisins (fyrir kísil er $\varepsilon_r \approx 11.9$). Ef litið er á p-n skeytu sem ósamhverft skeytu þar sem annað svæðið er mun þyngra dópað en hitt (p^+n -mótt), má sýna að sambandið milli rýmdar og bakspennu er gefið með jöfnunni:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V_R)}{q N_D \varepsilon_0 \varepsilon_r A^2} \quad (2)$$

þar sem q er hleðsla rafeindar.

Fyrir díóður þar sem dópunin breytist smám saman inn í efnið (*non-abrupt*) er ekki hægt að gera ráð fyrir einum föstum dópunarstyrk, N_D . Í slíkum tilfellum getur dópunin breyst með fjarlægð x frá skeytinu og því má ákvarða breytilegan dópunarstyrk, $N_D(x)$, með sambandinu:

$$N_D(x) = \frac{2}{q \varepsilon_0 \varepsilon_r A^2 \left| \frac{d(1/C^2)}{dV_R} \right|}. \quad (3)$$

Þegar díóða er framspennt flytjast rafeindir frá n-hliðinni yfir í p-hliðina. Við það minnkar berasnauðabilið og díóðan byrjar að leiða straum. Straumurinn er þó ekki mikill í fyrstu og er það ekki fyrr en að spennan nær hnéspennu sem hann byrjar að aukast. Hnéspenna tengist bæði orkugeil efnis og íbótarstyrk p- og n-hliðar. Orkugeilið endurspeglar hversu mikla orku þarf til

þess að flytja rafeind frá gildisborða og upp í leiðniborða. Því stærra sem orkugeilið er því hærri verður hnéspenna díóðunnar. Út frá hnéspennu efnis má þá bera saman mismunandi díóður og á sama tíma má álykta um stærð orkugeilsins. Hnéspennan ræðst einnig af íbótarstyrk p- og n-hliðar. Innbyggða spenna p-n skeytisins má nálga með:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right), \quad (4)$$

þar sem N_A og N_D eru íbótarstyrkir og n_i er eiginhleðsluberaþettleiki. Eins og má sjá með jöfnunni þá hækkar V_{bi} með auknum íbótarstyrk og þar af leiðandi hækkar hnéspennan. Við bakspennta díóðu er straumurinn líttill þar til að gegnumbrot verður við gegnumbrotsspennu, V_{BD} . Gegnumbrotsspennan verður lægri með háum íbótarstyrk og má lýsa með:

$$V_{BD} \propto \frac{1}{N_D}. \quad (5)$$

Petta sést einnig á mynd 1 þar sem að gegnumbrotsspenna Ge, Si, GaAs og GaP minnkar með auknum íbótarstyrk.

Ef díóða er lengi framspennt geta safnast upp minnihlutaberar öðru megin í efninu. Við spennubreytingu yfir í neikvæða spennu eða bakspennu þarf díóðan tíma til að fjarlægja hleðsluna sem hefur safnast fyrir. Sá tími kallast viðbragðstími díóðunnar og er táknaður með t_s . Viðbragðstíminn tengist líftíma hola, τ_p , samkvæmt jöfnunni:

$$t_s = \tau_p \ln\left(1 + \frac{I_F}{I_B}\right) \quad (6)$$

þar sem I_F er straumur díóðunnar þegar hún er framspennt og I_B er straumur díóðunnar þegar hún er bakspennt. Því lengri sem líftími holanna er því hærri verður viðbragðstíminn, t_s .

3 Framkvæmd

3.1 C-V mælingar

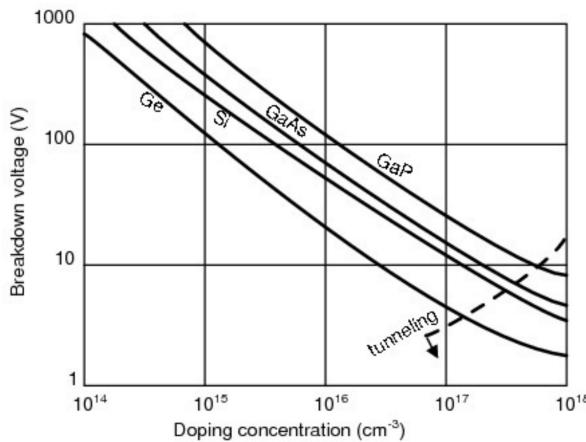
Tilrauninni er skipt í þrjá hluta þar sem mismunandi eiginleikar díóða eru skoðaðir. Í fyrsta hluta tilraunarinnar er rýmd díóða mæld sem fall af bakspennu, V_R , með C-V mæli fyrir þrjár díóður, 1N4007, BYS26-45 og BZX55C13 (Zener). Bakspennunni er breytt í jöfnum skrefum og rýmd lesin af mælinum. Þar sem Zener-díóðan (BZX55C13) þolir ekki mikla bakspennu er V_R aðeins aukin upp í 13 V fyrir þessa díóðu en fyrir 1N4007 og BYS26-45 er spennan aukin upp í 40 V.

3.2 I-V mælingar

Í öðrum hluta tilraunarinnar eru skoðaðar I-V myndir fyrir sjö mismunandi díóður, tvær kísildíóður BZX55C4V7 og 1N4007, fjórar ljósdióður og einn nóra AC187 Ge. Notaðar eru tvær lappir á nóranum og þá fæst díóða með n-p-skeyti. Það er gert með því að nota mælibox sem er tengt á sveiflusjá á XY stillingu. X-ásinn táknað spennuna yfir díóðuna og Y-ásinn strauminn í gegnum hana. Skalann má svo stilla eftir vild en gott er að hafa þá eins fyrir hverja díóðu eða skoða þá nákvæmlega hver þróskuldspennan er til þess að geta skoðað mismunandi hnéspennur díóðanna.

3.3 Mælingar á viðbragðstíma díóða

Í þriðja hluta tilraunarnar er athugað viðbragðstíma díóða. Spennugjafi er raðtengdur við díóðu og $1 \text{ k}\Omega$ viðnám. Á myndum 13 og 14 má sjá gula línu sem sýnir kassabylgjuna frá spennugjafanum og bláa línan sýnir spennuna yfir viðnáminu. Með því að skoða spennuna yfir viðnáminu er hægt að sjá tímaminn t_s og strauminn þegar díóðan er framspennt og bakspennt. Viðbragðstíminn t_s er lesinn af x-ásnum sem bilið frá því að framspennan yfir díóðunni verður núll og þar til bakspennan verður einnig núll. Með þessum gögnum má reikna líftíma holanna með jöfnu (6).



Mynd 1: Mynd úr [1]. Samband gegnumbrotpennu og dópunarstyrks fyrir mismunandi hálfleiðaraefni.

4 Niðurstöður og umræða

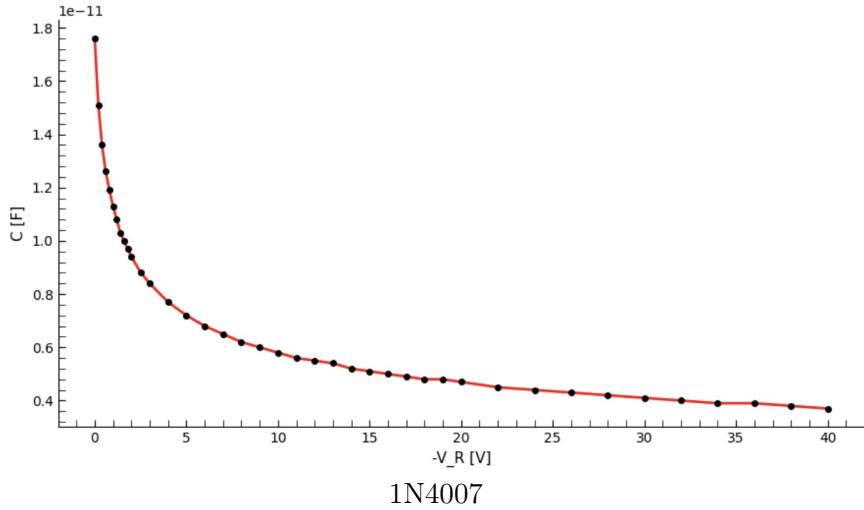
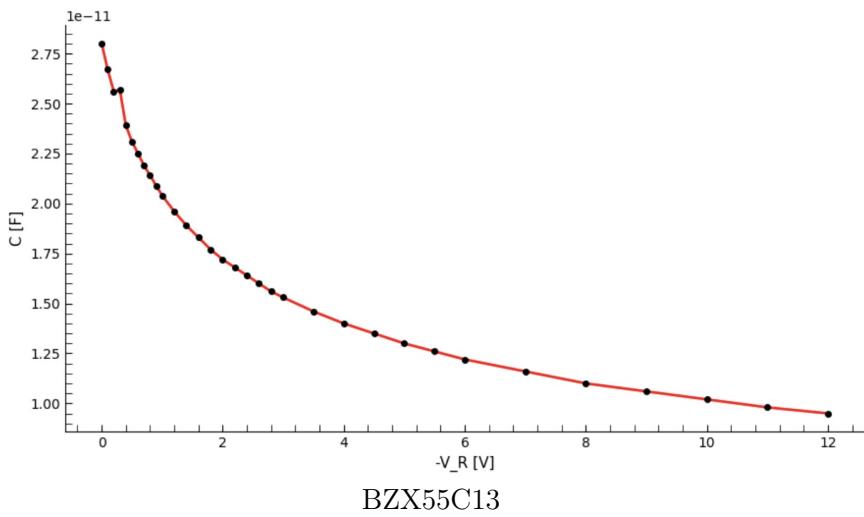
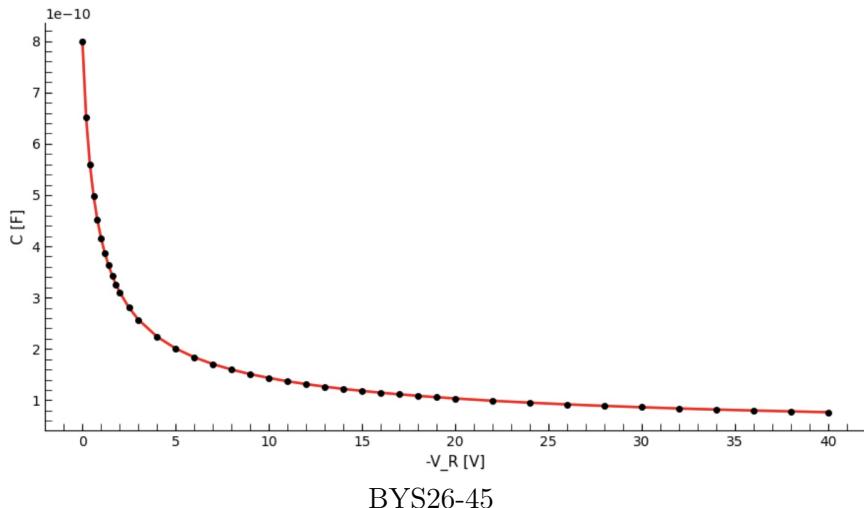
4.1 C-V mælingar

Mynd 2 sýnir mælda rýmd, C , sem fall af bakspennu, $-V_R$, fyrir díóðurnar BYS26-45, BZX55C13 og 1N4007. Rýmdin minnkar með vaxandi bakspennu sem samsvarar því að berasnauðabil díóðunnar víkkar.

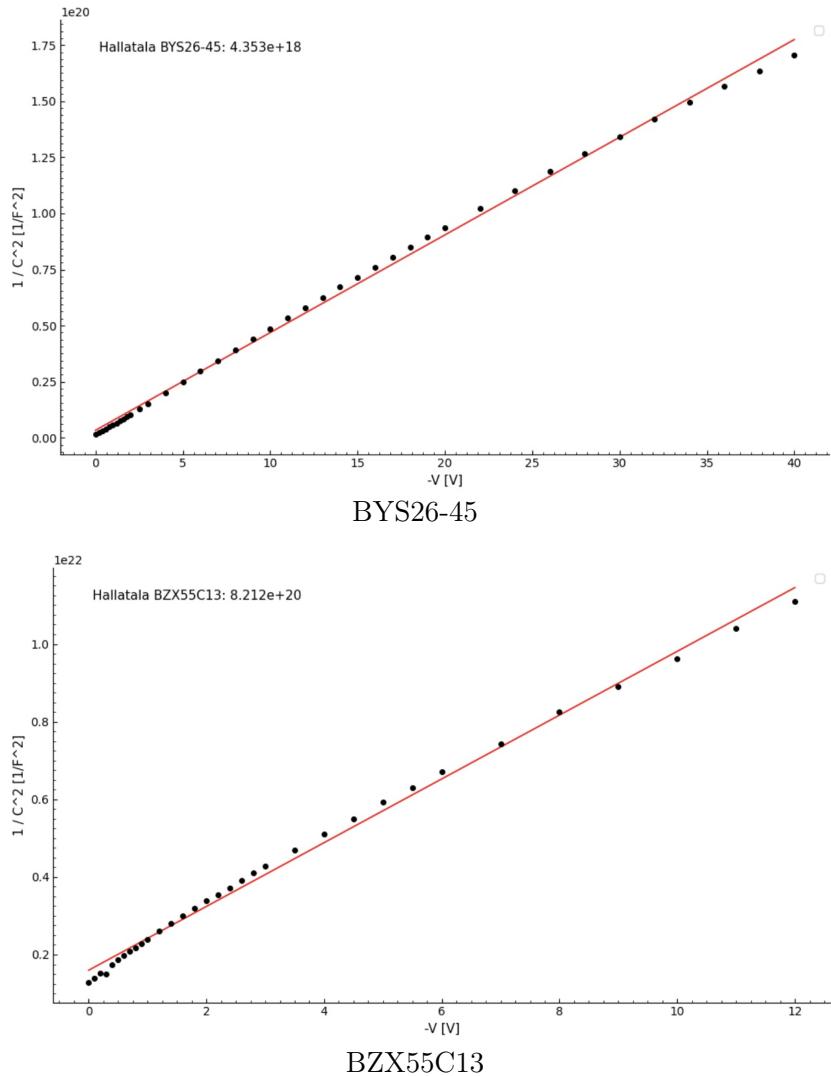
Mynd 3 sýnir graf af $1/C^2$ sem fall af bakspennunni, $-V_R$, fyrir díóðurnar BYS26-45 og BZX55C13. Samkvæmt jöfnu (2) ásamt hallatölunni m , fæst dópunarstyrkurinn:

$$N_D = \frac{2}{q \varepsilon_0 \varepsilon_r A^2 m}. \quad (7)$$

Fyrir díóðuna BYS26-45 er $m_1 = 4,35 \times 10^{18} (\text{F}^{-2}\text{V}^{-1})$ og $A = 1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. Þá gefur jafna (7) að $N_D = 1,39 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Á mynd 1 má sjá að fyrir slíkan dópunarstyrk er gegnumbrotpennan í kringum 40 V - 50 V. Fyrir díóðuna BZX55C13 er $m_2 = 8,21 \times 10^{20} (\text{F}^{-2}\text{V}^{-1})$ og $A = 4,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2$. Á sama hátt fæst að $N_D = 7,1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ og samkvæmt mynd 1 er gegnumbrotpennan í kringum 15V. Þetta sýnir að hærri dópunarstyrkur leiðir til lægri brotpennu.



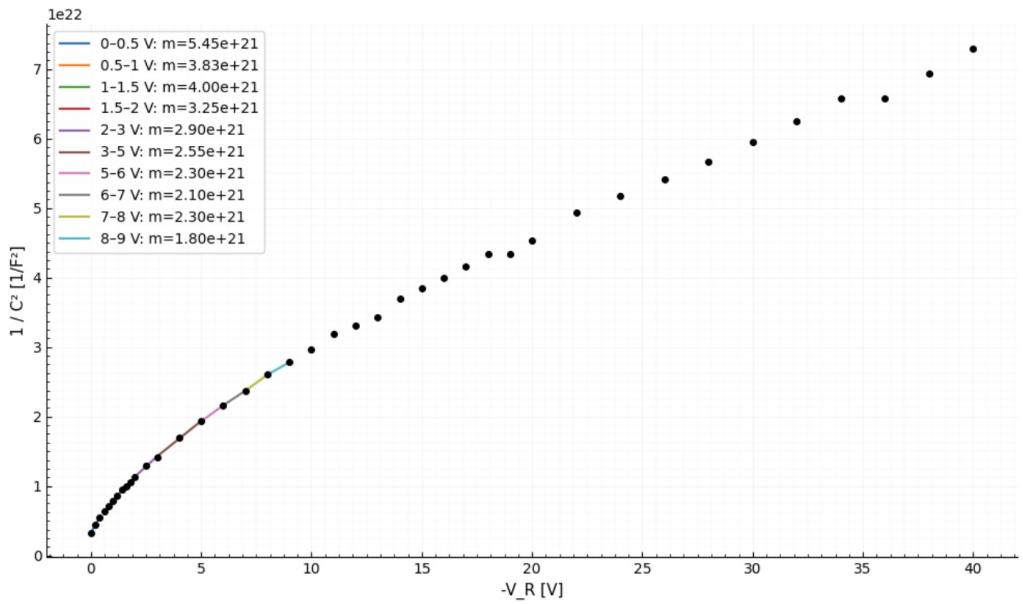
Mynd 2: Rýmd, C , sem fall af bakspennu, $-V_R$, fyrir díóðurnar BYS26-45, BZX55C13 og 1N4007.



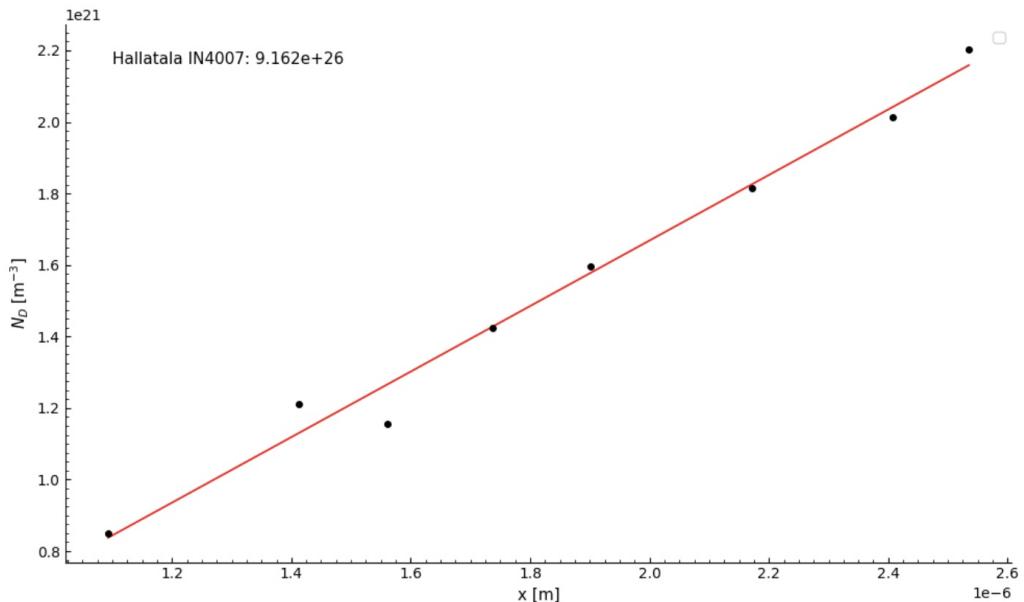
Mynd 3: Graf af $1/C^2$ sem fall af $-V_R$ fyrir díóðurnar BYS26-45 og BZX55C13.

Mynd 4 sýnir graf af $1/C^2$ sem fall af bakspennunni, $-V_R$, fyrir díóðuna 1N4007. Hér má sjá að $1/C^2$ er ekki línulegt yfir allt spennubilið sem bendir til þess að dópunin er ekki jöfn nálægt p-n-skeytinu. Með því að lesa hallatölur á mismunandi spennubilum má finna dópunarstyrkinn, N_D , fyrir hvert bil með jöfnu (3). Þar sem berasnauðabilið, w , breikkar þegar bakspennan eykst er einnig ákvarða hvernig fjarlægðin, x , inn í díóðunni breytist með jöfnu (1).

Mynd 5 sýnir hvernig dópunarstyrkurinn, N_D , breytist með fjarlægðinni, x , inn í díóðuna. Sjá má að sambandið er nær línulegt og að N_D eykst með aukinni dýpt. Þetta endurspeglar að p-íbótin er að lækka þegar fjær dregur skeytinu þannig að dópunin er lægst við p-n-skeytið en verður hærri þegar farið er dýpra inn í efnið.



Mynd 4: Graf af $1/C^2$ sem fall af $-V_R$ fyrir díóðuna 1N4007.



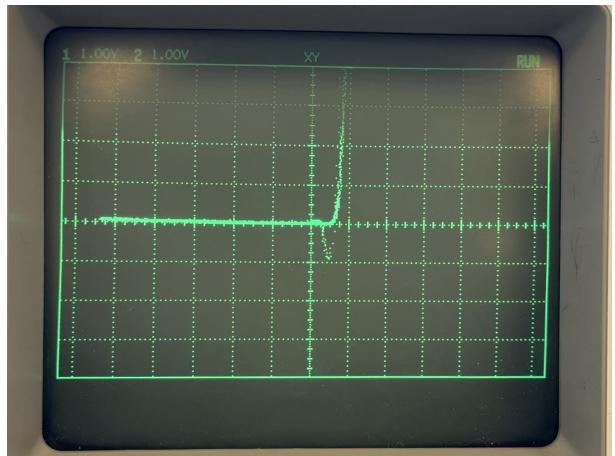
Mynd 5: Graf af dópunarstyrk, N_D , sem fall af fjarlægðinni, x , inn í díóðuna 1N4007 n-megin.

4.2 I-V mælingar

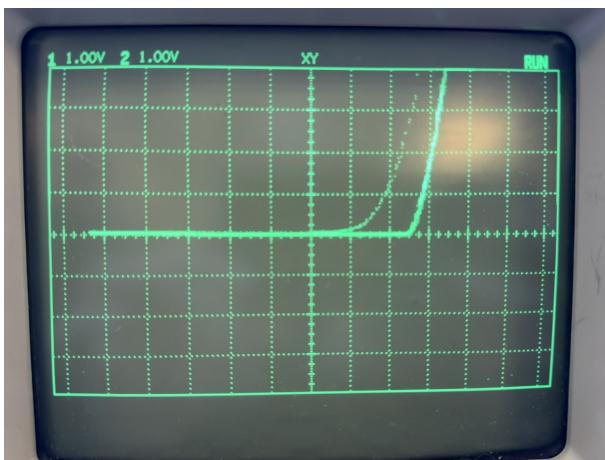
Skoðuð var hnéspennu sjö mismunandi díóðum og niðurstöður þeirra bornar saman. Á myndum 6–12 má sjá I-V myndir díóðanna.



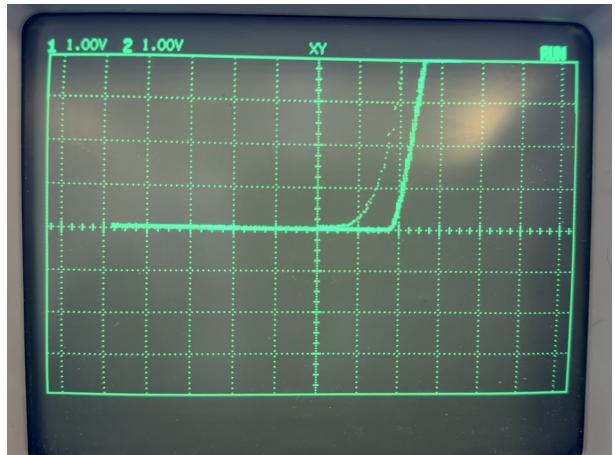
Mynd 6: Hnéspenna BZX55C4V7 kísildíóðu sem er um 0,85 V. Hér má sjá gegnumbrotspennu díóðunnar.



Mynd 7: Hnéspenna 1N4007 kísildíóðu sem er um 0,7 V, sem passar við hefðbundna kísildíóðu.



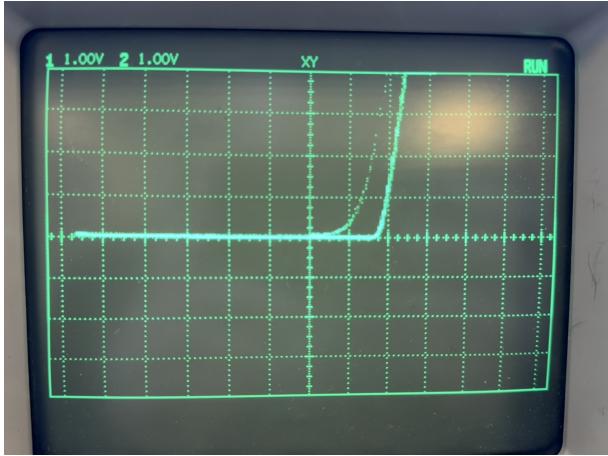
Mynd 8: Hnéspennan fyrir bláa ljósdíóðu. Á myndinni má sjá að bláa ljósdíóðan sýndi hæstu hnéspennuna.



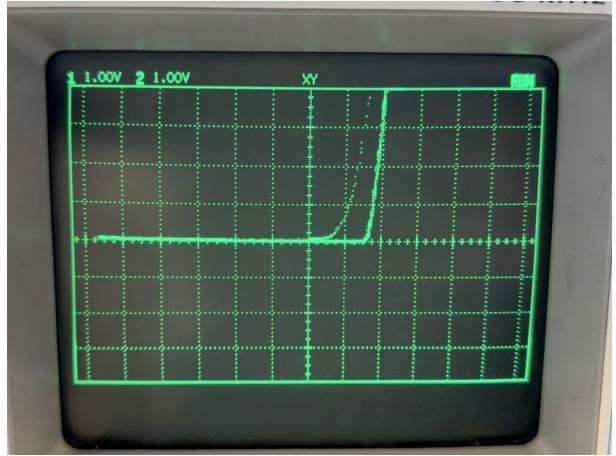
Mynd 9: Hnéspennan fyrir græna ljósdíóðu.

Á myndum 6 og 7 má sjá hnéspennu tveggja kísildíóðanna. Á mynd 6 má sjá að hnéspennan er um 0,85 V og mynd 7 sýnir hnéspennu um 0,7 V. Samkvæmt jöfnu (4) fyrir innbyggðu spennuna V_{bi} hækkar V_{bi} með auknum íbótarstyrk N_A og N_D og má nálga að hnéspennan sé u.p.b. sú sama og innbyggða spennan. Munurinn á hnéspennum díóðanna bendir þá til þess að BZX55C4V7 hafi hærri íbótarstyrk en 1N4007. Á mynd 6 sést bakstraumur við neikvæða spennu svo þar hefur orðið gegnumbrot. Samkvæmt sambandinu $V_{BD} \propto 1/N_D$ hefur díóða með hærri íbótarstyrk lægri gegnumbrotsspennu.

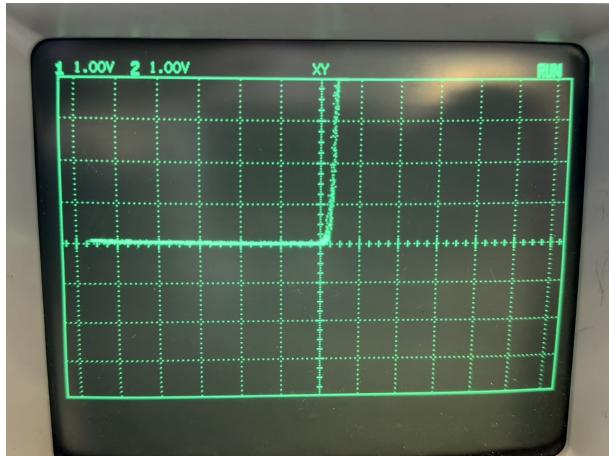
Ljósdíóðurnar sýndu hærri hnéspennu en kísildíóðurnar. Á mynd 8 má sjá að bláa díóðan hafði hæstu hnéspennuna af ljósdíóðunum. Gula díóðan hafði lægstu hnéspennuna sem má



Mynd 10: Hnéspennan fyrir gula ljósdíóðu.



Mynd 11: Hnéspennan fyrir rauða ljósdíóðu.



Mynd 12: Hnéspennan fyrir germaníum nórann. Þetta er lægsta hnéspennan af öllum díóðunum og var um 0,2 V.

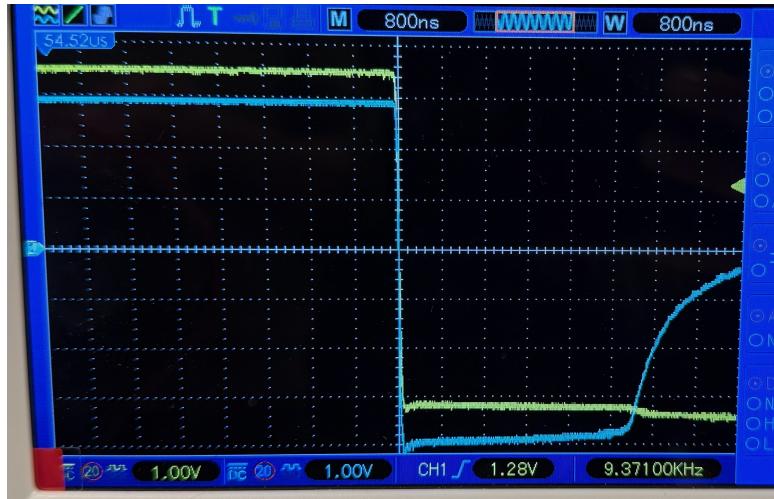
sjá á mynd 11. Á mynd 12 má einnig sjá að hnéspenna nórans er mjög lág eða um 0,2V. Þessar niðurstöður sýna að samband hnéspennu og stærð orkugeils eru í samræmi. Þar sem að ljósdíóður hafa almennt stærra orkugeil en kísildíóður hafa þær einnig hærri hnéspennu en kísildíóður. Nórinn sem var notaður sem díóða hafði hnéspennu um 0,2 V. Það passar þar sem að nórinn var úr germaníum og orkugeilið í honum er almennt ekki stórt.

4.3 Mælingar á viðbragðstíma díóða

Mældur var viðbragðstími, t_s , tveggja díóða. Á mynd 13 má sjá að fyrri díóðan 1N4007 sýndi neikvæðan straum þegar hún var bakspennt. Það bendir til þess að minnihlutaberar eða holur í þessu tilfelli höfðu safnast fyrir í n-hlutanum og þær þurftu tíma til að lenda í samruna við rafeindir. Neikvæður straumur gefur þá til kynna langan líftíma holanna sem er í samræmi við reiknað gildi líftímans með jöfnu (6). Þá var

$$\tau_p = 9,83 \mu\text{s}$$

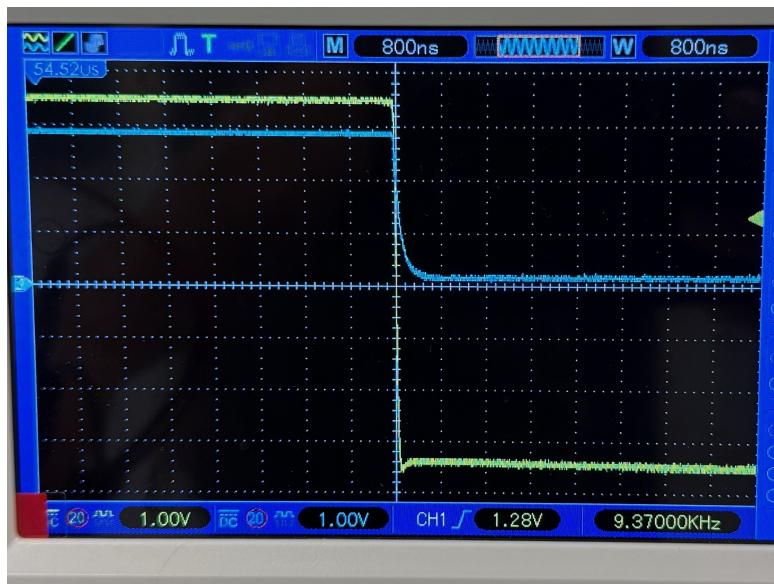
Á mynd 14 má sjá að díóðan BAT48 sýndi engan neikvæðan straum við bakspennu. Það



Mynd 13: 1N4007 díóðan sýndi neikvæðan straum þegar hún var bakspennt. Út frá myndinni má ákvarða t_s , I_B , og I_F .

þýðir að holurnar lento strax í samruna við rafeindirnar og safnast þá ekki fyrir. Það þýðir að líftími holanna er mjög lágor eða ekki er hægt að reikna hann með jöfnu (5) þar sem að straumurinn I_R er ekki sýnilegur.

Hægt er að nýta sér líftíma hola í díóðu. Því lægri sem líftíminn er því hraðara viðbragð hefur díóðan sem er gott í hraðvirkum rásum. En þegar líftími holanna er lengri má nýta það í að leiða meiri straum þegar díóðan er bakspennt.



Mynd 14: BAT48 díóðan sýndi ekki neikvæðan straum og því ekki hægt að ákvarða líftíma holanna.

5 Lokaorð

Í þessari tilraun voru skoðaðir mismunandi eiginleikar díóða með C-V mælingum, I-V mælingum og mælingum á viðbragðstíma. Úr C-V mælingum var íbótarstyrkur ákvarðaður og niðurstöður sýndu að hærri íbótarstyrkur leiðir til lægri gegnumbrotpennu. Fyrir díóðuna 1N4007 fékkst að íbótin eykst með dýpt inn í n-efnið frá p-n-skeytinu. I-V mælingarnar sýndu að orkugeil og íbótarstyrkur ráða hnéspennu og gegnumbrotpennu. Hærri hnéspenna samsvarar stærra orkugeili við hærri íbótarstyrk verður gegnumbrotpennan lægri. Viðbragðsmælingar sýndu að díóður með lengri líftíma hola hafa hærra viðbragð.

[1] [2] [3]

Heimildir

¹Háskóli Íslands, Raunvísindadeild, *Tilraun 2: Diodes*, Háskóli Íslands (2025).

²7 pn Junction Diode: Small-Signal Admittance, Háskóli Íslands, 2025.

³8 pn Junction Diode: Transient Response, Háskóli Íslands, 2025.