

Tranzistor s ionskom tekućinom

Damjanović, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/um:nbn:hr:217:471406>

Rights / Prava: [In copyright/Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-24**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Marko Damjanović

TRANZISTOR S IONSKOM TEKUĆINOM

Diplomski rad

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA I INFORMATIKA; SMJER NASTAVNIČKI

Marko Damjanović

Diplomski rad

Tranzistor s ionskom tekućinom

Voditelj diplomskog rada: dr.sc Emil Tafra

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2019.

Sažetak

U novije vrijeme ostvaren je značajan napredak u elektrostatskom dopiranju izolatora pomoću ionskih tekućina. Posebno su zanimljivi izolatori STiO₃ i KTaO₃ perovskitne strukture, kod kojih je elektrostatskim dopiranjem ostvarena dobra vodljivost s visokom pokretljivošću elektrona, te supravodljivost na vrlo niskim temperaturama. Cilj rada je istražiti utjecaj elektrostatskog dopiranja pomoću ionske tekućine na svojstva tih i sličnih materijala. Predviđa se postavljanje električnih kontakata na uzorak istraživanog materijala, koji bi predstavljali izvor i odvod, a vrata bi bila ostvarena preko ionske tekućine, te bi tako bio realiziran tranzistor. Također se predviđa sastavljanje programa za mjerjenje i kontrolu eksperimenta (unutar postojećeg programskog paketa s grafičkim sučeljem), vršenje mjerjenja strujno-naponskih karakteristika, te analiza opaženih pojava.

Ključne riječi: dopiranje, ionska tekućina, strujno-naponska karakteristika, tranzistor

Transistor with ionic liquid

Abstract

In recent time significant progress has been made in the electrostatic doping of insulators using ionic liquids. The most interesting are isolators STiO₃ and KTaO₃ with perovskite structure that allows them good conductivity with high electron mobility achieved and superconductivity on very low temperatures, all by electrostatic doping. Purpose of thesis is to investigate electrostatic doping with ionic liquids on mentioned materials or similar. Making and mounting electrical contacts on sample material that will represent source and drain, with gate as ionic liquid of a transistor. Assembly of measurement and control programs is also excepted (all made within an existing software package with graphic interface). Measurement of current and voltage characteristics, and analysis of the observed appearance.

Keywords: current-voltage characteristics, doping, ionic liquid, transistor

Sadržaj

1 Uvod	1
2 Metodički dio	2
2.1 Uvod	2
2.2 Poluvodiči: teorijski uvod	2
2.2.1 Energijske vrpce	2
2.2.2 Vrste poluvodiča	3
2.2.3 Primjene poluvodiča	6
2.3 Položaj nastavne teme u kurikulumu	6
2.4 Tijek sata	8
2.4.1 Uvodni dio sata	8
2.4.2 Središnji dio sata	9
2.4.3 Završni dio sata	11
3 Teorija	12
3.1 Uvod	12
3.2 Elektrostatsko dopiranje	12
3.3 EDL i Helmholtzov model	12
3.4 Ostali modeli	13
3.5 Elektrokemijsko dopiranje	14
3.6 Nove mogućnosti i primjene	15
3.7 EDLC	15
3.8 Supravodljivost	15
4 Tijek izrade tranzistora	16
4.1 Priprema uzorka	16
4.2 Izrada elektroda i testiranje	17
4.3 Izrada vrata tranzistora	19
4.4 Konačan uzorak i postav	20
5 Mjerni postav	22
5.1 Uvod	22
5.2 Općeniti postav	22
5.3 Keithley 6487	23
5.4 Keithley 2611	25
5.5 LabView programski paket	26
5.6 JFET K246	28
6 Rezultati mjerena	29
6.1 Izvor X-28	30
6.2 Izvor 14-D	37
6.3 Analiza rezultata mjerena	42
7 Zaključak	44
Literatura	45

1 Uvod

Tranzistori su osnovna građevna jedinica svakog modernog uređaja. Iako njihova povijest je vrlo mlada te potječe iz sredine prošlog stoljeća uvelike su promijenili današnji način života. Promjene se događaju i njima. Današnja istraživanja pomicu granice u manipulaciji materijala. Elektrostatsko dopiranje se pokazalo kao učinkoviti način promjene stanja materijala. Moguće ga je postići pomoću različitih polimera, soli, kompozita i tekućina kao vrata, a oksidi, metali, grafen i organski materijali kao materijal dopiranja. Posljednjih godina ionske tekućine su postale predmetom istraživanja u području dopiranja. Svojim svojstvima su se istaknule kao alternativno rješenja za današnje ekološki neprihvatljive elektrolite. Istražit ćemo elektrostatsko dopiranje ionske tekućine na komadu stroncijevog titanata (STiO_3). Rad započinje s metodičkim dijelom gdje ćemo opisati tijek nastavnoga sata na temu poluvodiča. Nakon toga nastavljamo s teoretskim uvodom gdje ćemo se upoznati s osnovnim konceptima elektrostatskog dopiranja. Pojasnit ćemo pojavu električnog dvostrukog sloja koja je zaslužna za tranziciju materijala u poluvodič. Detaljnije diskutirati o posljedicama elektrostatskog dopiranja, što ona omogućavaju i zašto je ona danas sve češća tema istraživanja. Osmislit ćemo postupak izrade uzorka kojeg ćemo podvrgnuti dopiranju i ostvariti tranziciju iz izolatora u poluvodljivi materijal. Detaljno opisati sami postupak izrade tranzistora i samim time ćemo omogućiti reprodukciju postupka za buduća istraživanja. Sastavit ćemo mjerni postav i koristit ćemo programsko rješenje za obradu mjerjenja. Cilj nam je uz pomoć profesionalnih instrumenata odrediti strujno naponsku karakteristiku uzorka. Uzorak ćemo podvrgnuti promjeni parametara (promjena kontakata, napona) te što više prikupiti mjernih podataka. Uz pomoć QTiPlot-a ćemo nacrtati karakteristike. Osim uzorka vršit ćemo mjerjenje karakteristike na testnom tranzistoru. On će nam poslužiti kao referentna točka za uspoređivanje rezultata mjerjenja uzorka. Osim mjerjenja pratit ćemo moguće promjene na uzorku kao što su izobličenje uzorka i promjena svojstava ionske tekućine.

2 Metodički dio

2.1 Uvod

Nastavna jedinica Poluvodiči pripada nastavnoj cjelini Fizika čvrstog stanja u starom kurikulumu fizike. Ona nije dio programa u novom gimnazijskom kurikulumu [1]. Može se obraditi krajem drugog polugodišta u četvrtom razredu tehničkih strukovnih škola i gimnazija, dok još uvijek rade po starom kurikulumu. Učenici prethodno moraju savladati strukturu tvari te čestični model tvari. Potrebno im je i prethodno poznavanje elektrostatike i električne struje.

2.2 Poluvodiči: teorijski uvod

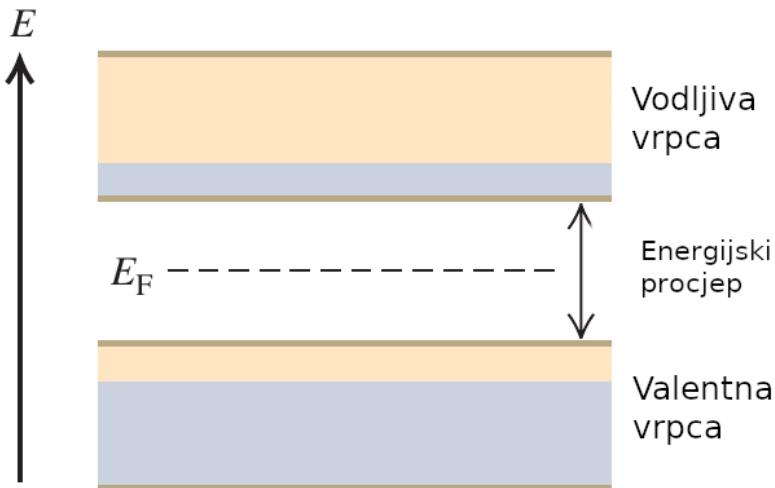
Materijale možemo podijeliti s obzirom na njihovu električnu vodljivost na izolatore, poluvodiče i vodiče. Izolatori ne provode električnu struju. Za razliku od izolatora vodiči imaju veliku električnu vodljivost. Poluvodiči su posebna vrsta materijala koji pod određenim uvjetima imaju svojstva izolatora ili vodiča. Klasična fizika objašnjava razliku između vodiča i izolatora time što u vodičima postoje slobodni elektroni, a kod izolatora oni ne postoje [2]. Ovo pojednostavljeni objašnjenje nije u potpunosti točno jer slobodni elektroni u vodičima nisu u potpunosti slobodni (npr. u metalima osjećaju privlačne sile pozitivnih iona) a izolatori na višim temperaturama mogu imati slobodne elektrone.

2.2.1 Energijske vrpce

Pravo objašnjenje razlike između izolatora, poluvodiča i vodiča omogućava nam kvantna fizika. Slobodni elektron unutar atoma privlačnim je silama vezan uz sam atom. Njegovo energijsko stanje možemo predočiti kao potencijalnu jamu. Paulijevo načelo isključenja nam govori da dva elektrona ne mogu biti u stanju istih kvantnih brojeva. Udruživanje atoma u kristalnu strukturu uzrokuje da se atomi približe na udaljenost pri kojoj osjećaju prisustvo susjednih elektrona u istom energijskom stanju.

Zbog Paulijevog načela događa se cijepanje energijskih razina elektrona ili degeneracija prilikom koje se pojedina energijska razina dijeli na različite podrazine. Uzmemo li primjer dva elektrona na istoj energijskoj razini, njihova zajednička energijska razina će se rascijepiti na dvije energijske podrazine pri čemu je jedna iznad, a druga ispod prvostrukne energijske razine. Što je veći broj elektrona na istoj energijskoj razini, to je veći broj podrazina. Uzmemo li realnu situaciju u kojoj je broj atoma 10^{24} imat ćemo jako veliki broj podrazina koje su zgasnute, kontinuirano raspoređene te ih je teško razlučiti. Tada umjesto pojma energijska razina koristimo pojma energijskih vrpca.

Energijske vrpce su energijski pojasi koji obuhvaćaju sve podrazine pojedine energijske razine. Najvišu energijsku vrpcu koja je popunjena barem nekim stanjima nazivamo valentnom vrpcom, a iznad nje se nalazi vodljiva vrpcu. Između valentne i vodljive vrpce nalazi se zabranjeni pojas (ili energijski procijep) u kojem elektroni ne mogu imati energetsko stanje. Slika 2.1 prikazuje raspored energijskih vrpci unutar materijala.



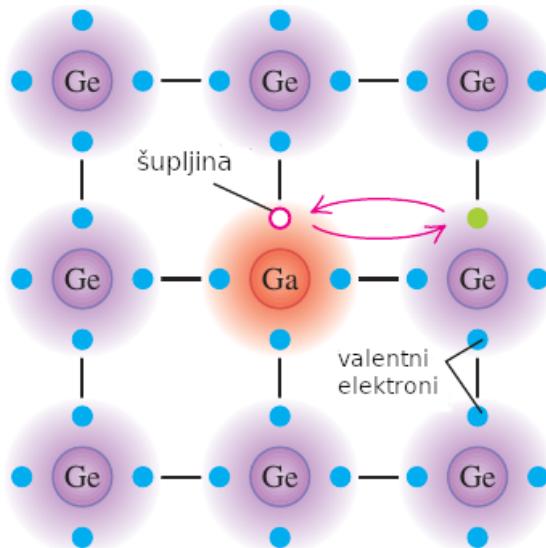
Slika 2.1: Raspored energijskih vrpc (preuzeto iz [3])

Razlika između pojedinog materijala je u širini energijskog procijepa. Vodiči imaju najmanji energetski procijep, izolatori najveći, a poluvodiči su između njih. Vodiči zbog naružega energijskog procijepa imaju mogućnost lakšeg prijelaza valentnih elektrona u vodljivu vrpcu. Osim toga vodiči na sobnoj temperaturi imaju više elektrona u vodljivoj vrpci (više slobodnih elektrona). Izolatori zbog svog širokog energijskog procijepa nemaju elektrone u vodljivoj vrpci čak ni pri višim temperaturama. Poluvodiči također nemaju elektrone u vodljivoj vrpci, ali ih je moguće energijski potaknuti pomoću više temperature ili dopiranjem tako da elektroni mogu uz manju energiju „preskočiti“ u vodljivu vrpku. Veličina energijskog procijepa za poluvodiče je reda veličine 1eV [4].

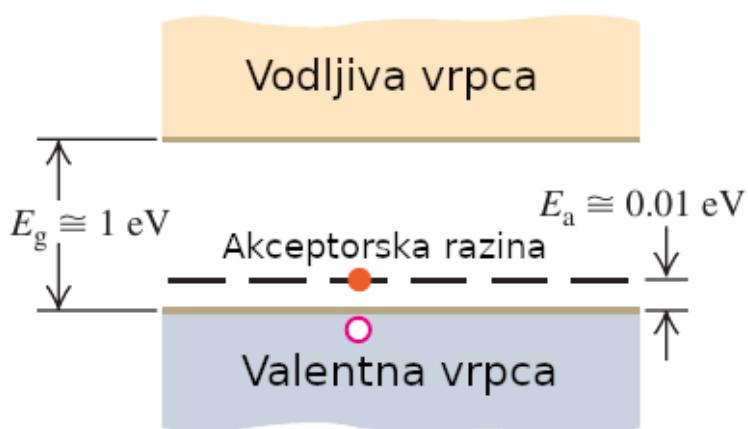
2.2.2 Vrste poluvodiča

Podjela poluvodiča temelji se na čistoći, odnosno koriste li se primjese za postizanje određenih svojstava poluvodiča. Intrinzični poluvodiči imaju sve atome istog protonskoga broja tj. ne posjeduju strane atome. Ekstrinzični poluvodiči posjeduju strane atome u svojoj strukturi. Strani atomi posjeduju valenciju različitu od valencije intrinzičnog poluvodiča, općenito je ona za jedan veća ili manja. Postupak „ubacivanja“ stranih atoma u čisti poluvodič zovemo dopiranjem. Broj stranih atoma koje unosimo u strukturu je otprilike što je zanemarivo u odnosu na broj atoma poluvodiča. Pomoću dopiranja možemo postići dva različita tipa poluvodiča: p i n.

Poluvodič p-tipa nastaje dopiranjem trovalentne primjese u poluvodič (Slika 2.2). Zbog manjka valencije strani atom „preotima“ elektron, da bi se mogao povezati u kristalnu rešetku, i time stvara slobodnu šupljinu. Šupljina je nedostatak elektrona istog iznosa naboja ali suprotnog predznaka (pozitivnog). Šupljine kao i elektroni mogu poslužiti kao nosioci naboja, iako se ne gibaju one, nego valentni elektroni dolaze do šupljina. Prividno se šupljina „pomiče“. Zbog Paulijevog načela pojavit će se dodatna energetska razina koja je posljedica primjese (zovemo je akceptorska), a nalazi se malo iznad valentne vrpce (Slika 2.3) tj. postoji mali energijski procijep između njih. Posljedica toga je da valentni elektroni mogu prelaziti u akceptorsku vrpku te im je potrebna manja energija za to u odnosu na prelazak u vodljivu vrpku.

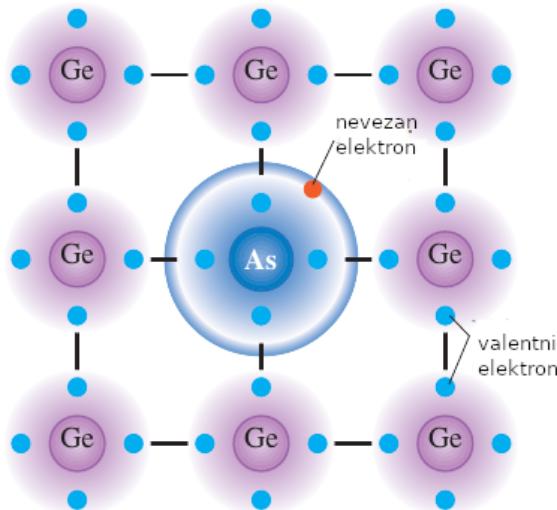


Slika 2.2: Kristalna struktura p-tipa poluvodiča (preuzeto iz [3])

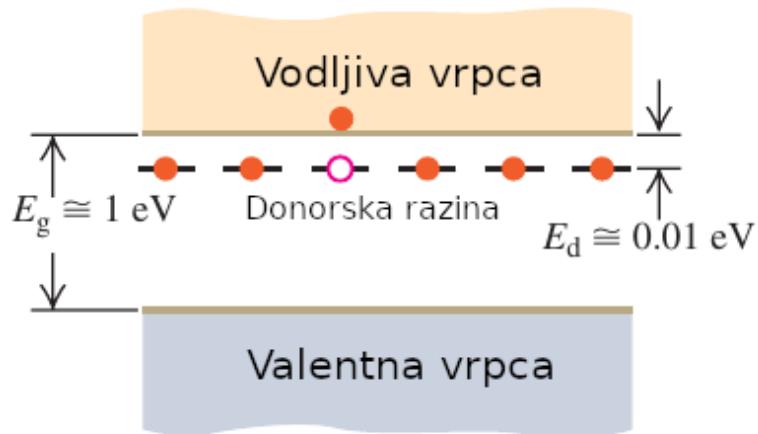


Slika 2.3: Raspored energijskih vrpcu p-tipa poluvodiča (preuzeto iz [3])

Poluvodič n-tipa nastaje dopiranjem peterovalentne primjese u poluvodič (Slika 2.4). Kako se strani atom povezuje s atomom manje valencije (četiri), tako preostaje jedan elektron nevezan. Nastaje nova energijska vrpca (donorska) koja se nalazi ispod vodljive vrpcu (Slika 2.5). Donorsku vrpcu popunjavaju spomenuti nevezani elektroni. Zbog malog energijskog procijepa elektroni iz donorske vrpcu prelaze u vodljivu vrpcu.

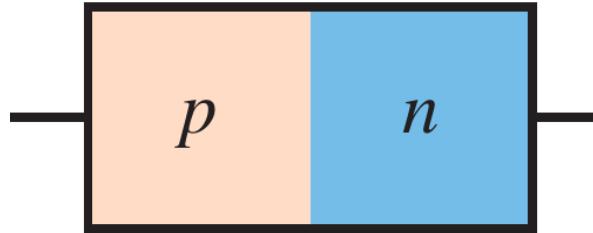


Slika 2.4: Kristalna struktura n-tipa poluvodiča (preuzeto iz [3])



Slika 2.5: Raspored energijskih vrpcia n-tipa poluvodiča (preuzeto iz [3])

Spajanjem p i n tipa poluvodiča nastaje p-n spoj (Slika 2.6). Spoj je posebno zanimljiv, jer se na području spajanja tipova poluvodiča stvara područje osiromašenja. Dio šupljina iz p-tipa i dio elektrona iz n-tipa se međusobno ponište (rekombinacija) i stvara se područje u kojem ne postoje naboji koji se mogu slobodno gibati. Na krajevima poluvodiča nalaze se naboji koji se nisu rekombinirali. Područje osiromašenja je aktivni dio p-n spoja [2]. Ono omogućava vođenje struje između p i n tipova poluvodiča koju možemo ostvariti pomoću napona. Spojimo li minus pol izvora na n kraj, a plus pol izvora na p kraj poluvodiča, područje osiromašenja će se sruziti i spoj je propusno polariziran. Zbog odbojnih sila između krajeva poluvodiča i polova baterije elektroni iz n dijela poluvodiča će moći proći u p dio poluvodiča odnosno teći će struja. Obrnemo li polaritet kojim spajamo na krajeve poluvodiča postići ćemo nepropusnu polarizaciju. Zbog privlačnih sila između krajeva poluvodiča i polova baterija elektroni iz n dijela neće moći proći u p dio poluvodiča.



Slika 2.6: Shematski prikaz p-tipa i n-tipa poluvodiča (preuzeto iz [3])

2.2.3 Primjene poluvodiča

Stvaranje p i n tipa poluvodiča omogućava veću vodljivost materijala. Osnovne građevne jedinice svih mikroelektroničkih uređaja, kao što su dioda, tranzistor, logički sklopovi te čipovi, su p i n tip poluvodiča. Moderne metode stvaranja poluvodiča omogućavaju stvaranje n i p tipa poluvodiča malih dimenzija. Spajanjem p i n tipa poluvodiča dobivamo diodu, koja je jedan od najosnovniji elemenata elektroničkih sklopova. Dioda ima mogućnost propuštanja struje u jednom smjeru. Moguće ju je pronaći u svakom strujnom krugu zaduženom za ispravljanje izmjenične struje u istosmjernu.

2.3 Položaj nastavne teme u kurikulumu

Poluvodiči su nastavna tema koja je predviđena za četvrti razred gimnazija i četverogodišnjih tehničkih strukovnih škola. Nastavna jedinica je predviđena za jedan školski sat. Nastavni sat će primjenjivati istraživački usmjerenu nastavu u kojoj želimo da učenici istražuju, samostalno dolaze do zaključaka te budu aktivni sudionici u nastavi. Ustrojstvo nastavnoga sata će biti u tri osnovna dijela: uvodni, središnji i završni dio sata. U uvodnom ćemo dijelu sata demonstracijom pokusa uvesti učenike u problematiku i potaknuti ih na razmišljanje. U središnjem dijelu sata učenici će detaljnije opisati poluvodiče, njihovu podjelu te radom u skupinama otkrivati strukturu građu poluvodiča i ponašanje pn spoja (diode) u strujnom krugu. Radom u skupinama i metodom pisanja/crtanja ćemo potaknuti učenike na bolje promišljanje i razumijevanje koncepta stvaranja tipova poluvodiča. Završni dio sata je namijenjen za utvrđivanje novousvojenih koncepata gdje ćemo pomoći pitanja s karticama potaknuti učenike na obrazloženje novostečenih koncepata i uključenost u nastavu. Ostane li vremena, učenicima možemo prikazati primjere dioda, čipova i tranzistora koje se nalaze u današnjim modernim uređajima. Usvajanjem poluvodiča, mogu kasnije primijeniti znanje na razumijevanje rada tranzistora, logičkih i ispravljačkih sklopova.

OBRAZOVNI ISHODI

Učenici će:

- opisati razliku poluvodiča, vodiča i izolatora
- pokusom demonstrirati vrste materijala
- dati primjer kemijskog elementa poluvodičkih svojstava
- objasniti nastanak poluvodiča n i p tipa
- objasniti funkcioniranje pn spoja i diode
- skicirati strukturu p i n tipa poluvodiča
- razlikovati propusnu i nepropusnu polarizaciju diode
- razvijati sposobnost opažanja i kritičkog razmišljanja
- razvijati sposobnost znanstvenog zaključivanja

ODGOJNI ISHODI

- uvažiti tuđe mišljenje
- izraziti vlastito mišljenje na argumentiran način
- razvijati sistematičnost i urednosti
- surađivati u timskom radu

NASTAVNE METODE

1. Demonstracija pokusa
2. Metoda razgovora - usmjereni rasprava
3. Metoda pisanja /crtanja

OBLICI RADA

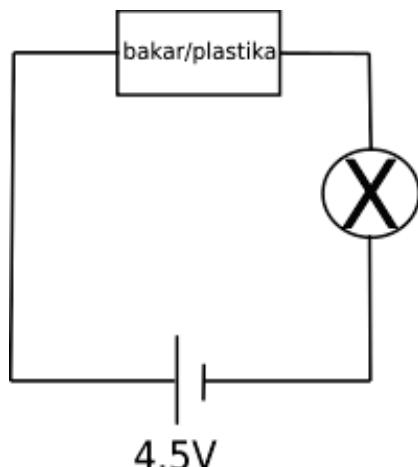
- Frontalni
- Rad u skupinama

2.4 Tijek sata

2.4.1 Uvodni dio sata

Uvodni dio sata započinjem pokusom. Pribor se sastoji od baterije, vodiča, žaruljice te komada bakra i plastike. Spojimo strujni krug kao na Slici 2.7.

Spojimo bakar u strujni krug.



Slika 2.7: Shema postava pokusa

Što će se dogoditi sa sjajem žaruljice ako spojimo bakar u strujni krug?

Pitamo učenike za mišljenje. Izvedemo pokus.

Učenici će uočiti da će žaruljica zasvijetliti što je u skladu s njihovim prijašnjim iskustvima. Umjesto bakra spojimo plastiku u strujni krug.

Što će se dogoditi sa sjajem žaruljice ako spojimo plastiku umjesto bakra?

Izvedemo pokus. Učenici će primijetiti da žaruljica nije zasvijetlila.

Zašto žaruljica nije zasvijetlila?

Razrednom diskusijom s učenicima podsjećam ih na podjelu materijala po električnoj vodljivosti, odnosno da bakar pripada u skupinu vodiča, a plastika u izolatore.

Može li se materijal u određenim situacijama ponašati kao vodič, a u drugima kao izolator i zašto?

Diskusijom s učenicima uvodim ih u video pokus [5].

Pokus se sastoji od istog mjernog postava gdje je korišten silicij umjesto bakra i plastike.

Od čega se sastoji mjerni postav?

Što će se dogoditi sa sjajom žaruljice ako spojimo silicij u strujni krug?

Pustimo pokus i ponovimo ga da učenici opaze pojavu.

Što ste vidjeli?

Učenici će primijetiti kako žaruljica ne svjetli.

Što će se dogoditi sa sjajem žaruljice ako zagrijemo silicij?

Pustimo pokus i ponovimo ga.

Što ste primijetili?

Učenici će primijetiti kako se sjaj žaruljice promijenio zagrijavanjem silicija.

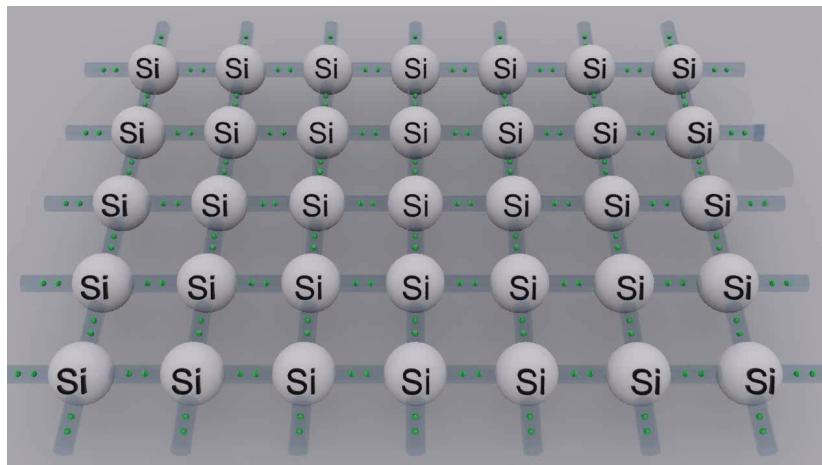
Je li silicij vodič ili izolator? Zašto?

Razrednom diskusijom zaključujemo kako je silicij poluvodič, nova vrsta materijala koja u određenim uvjetima može imati svojstva vodiča ili izolatora.

2.4.2 Središnji dio sata

IP1: Zašto je silicij postao vodič pri zagrijavanju?

Odgovor na pitanje potražit ćemo u simulaciji [5]. Simulacija prikazuje strukturu silicija i što se događa kad ga zagrijemo. Pokrenem simulaciju.



Slika 2.8: Shema postava pokusa [5]

Kakva je kemijska struktura silicija?

Kolika mu je valencija?

Što se događa s elektronima silicija ako ga zagrijemo?

Učenici moraju primijetiti da povećanjem temperature neki elektroni postaju slobodni te silicij počinje voditi električnu struju.

Što bi se dogodilo da u strukturi zamijenimo jedan atom silicija s atomom bora ili fosfora?

Skicirajte nove strukture.

Učenike podijelimo u grupe.

Koje su valencije bora i fosfora?

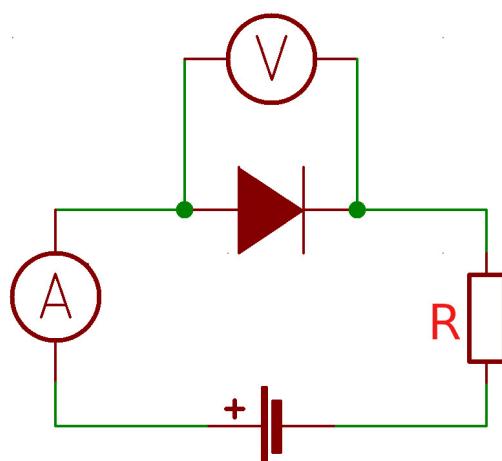
Grupnim radom učenici skiciraju nove strukture i daju objašnjenje.
Pomoću simulacije [6] pokažemo im p i n-tip poluvodiča.

Što bi se dogodilo da spojimo p i n tip poluvodiča?

Učenicima uvedem naziv dioda kao spoj p i n tipa poluvodiča.
Razrednom diskusijom pokušavamo zaključiti što se dogodi nosiocima naboja kad spojimo p i n tip poluvodiča.

Skiciramo na ploči pn spoj i pojasnimo pojavu rekombinacije.

IP2: Kako dioda vodi struju?



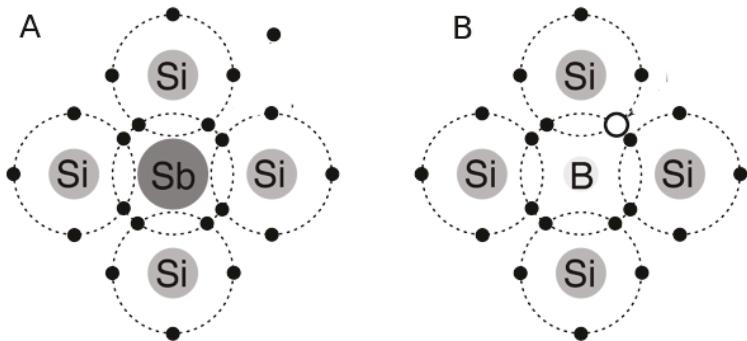
Slika 2.9: Shema mjernog postava

Učenici u grupama spajaju postav pokusa prema Slici 2.9. Opažat će ponašanje diode pri različitom polaritetu napona baterije, zapisati svoja opažanja. Diskutirati zašto je otpor spojen u strujni krug. Diskusijom i skicom pn spoja objasniti zašto dioda vodi struju pri određenom polaritetu baterije. Pomoću simulacije [7] objašnjavaju propusnu i nepropusnu polarizaciju, skiciraju je. Diskutiramo primjenu diode u elektronici.

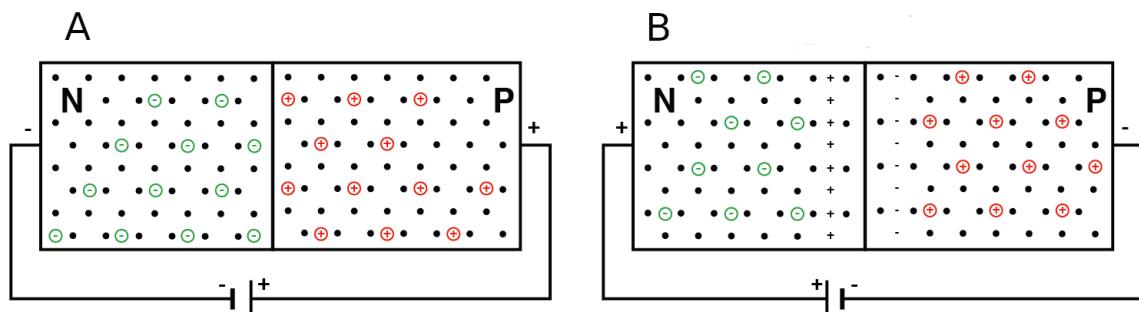
2.4.3 Završni dio sata

Pred kraj sata bih potaknuo učenike na razmišljanje pomoću konceptualnih pitanja s karticama.

1) Odredi tip poluvodiča za strukture A i B.



- A) A: n-tip, B: p-tip
 - B) A: p-tip, B: n-tip
 - C) A: p-tip, B: p-tip
 - D) A: n-tip, B: n-tip
- 2) Koja od ponuđenih slika prikazuje propusnu polarizaciju pn spoja poluvodiča?



- A) A
- B) B
- C) A i B
- D) nijedna

Osvrnuo bih utjecaj poluvodičkih materijala na današnju tehnologiju. Učenicima bih pokazao primjere diode, tranzistora, čipova i procesora. Ideja je učenicima pokazati kako su okruženi poluvodičima i koliki je njihov značaj u današnjem tehnološkom svijetu.

3 Teorija

3.1 Uvod

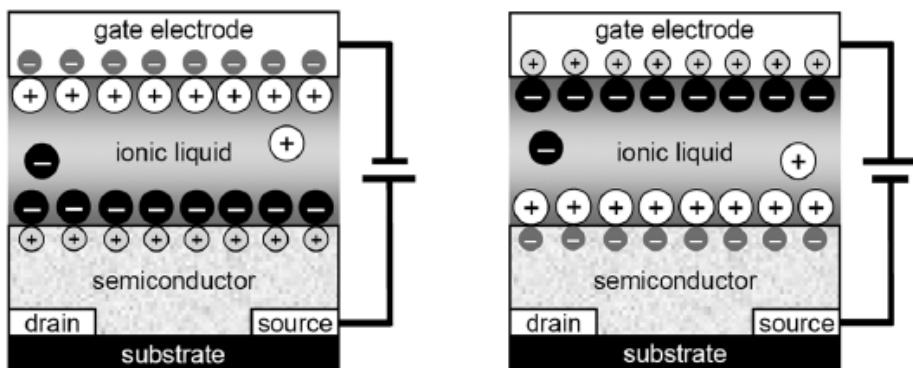
U posljednje vrijeme započelo je istraživanje drugih načina izrade tranzistora [8] [9]. Današnji proces njihove izrade je ekološki neprihvatljiv te je potraga za alternativnim "zelenim" rješenjima. Ionske tekućine su potencijalni kandidat. Nezapaljivost, visoka vodljivost, netoksičnost, kemijsku stabilnost, veliki elektrokemijski "prozor", mogućnost ponovne iskoristivosti otapala i zadržavanje agregatnog stanja u širokim temperaturnim rasponima su svojstva s kojima odstupa od tradicionalnih organskih otapala. Pojavljuju se u mnogim istraživanjima o novim elektrokemijskim uređajima (npr. punjive baterije). Omogućuju temperaturnu sigurnost i dugotrajnost (veći broj ciklusa punjena i pražnjenja) uređaja. Mana im je njihova visoka viskoznost te su atraktivnije ionske tekućine manjih viskoznosti. Mnoga istraživanja su fokusirana za upotrebu ionskih tekućina kao vrata za tranzistore s efektom polja (eng. FET) što je ujedno područje istraživanja ovog diplomskog rada.

3.2 Elektrostatsko dopiranje

Elektrostatsko dopiranje je postupak u kojoj se nosioci naboja (elektroni i šupljine) induciraju u poluvodički materijal kao rezultat poravnavanja energijskih vrpca na spoju s drugim materijalom (vodič/poluvodič) [10]. Kemijsko dopiranje postiže povećanje koncentracije nosioca naboja pomoću primjesa koje uvodimo u materijal. Primjese su atomi različitog elementa od materijala kojeg želimo dopirati. U prošlosti bio je uobičajeni način ostvarivanja prijelaza materijala u vodič, ali ima mnoge nedostatke (npr. ireverzibilnost procesa). Elektrostatsko dopiranje ostvaruje isti efekt (čak i veću koncentraciju slobodnih naboja) pomoću potencijala na elektrodu koja je smještena nasuprotno od poluvodičkog materijala kojeg želimo dopirati. Elektrostatsko stanje na spoju dvaju materijala usko je povezana s izlaznim radom materijala i širinom zabranjenog pojasa (E_G) [10].

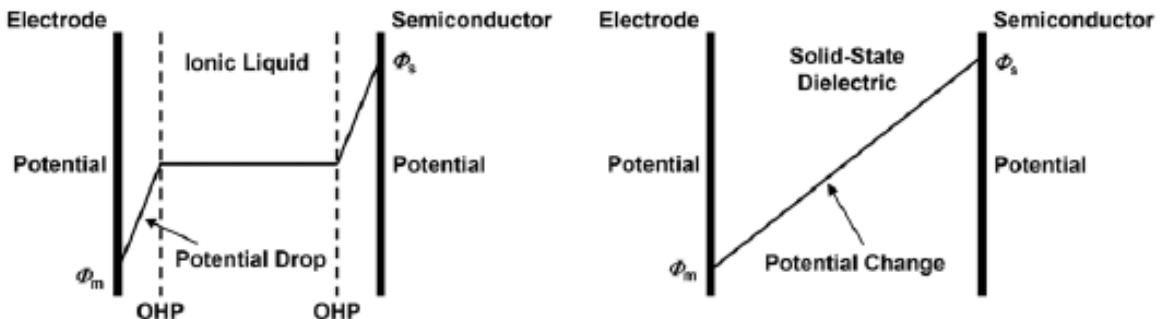
3.3 EDL i Helmholtzov model

Razlog korištenja ionske tekućine kao vrata tranzistora je u pojavi električnog dvostrukog sloja (eng. electric double layer) ili EDL na površini poluvodiča. Sloj se sastoji od parova šupljina i aniona, te parova elektrona i kationa (slike 3.1).



Slika 3.1: Shematski prikaz EDL-a (preuzeto iz: [8])

Pojavu EDL-a opisuju mnogi modeli, najpoznatiji od njih je Helmholtzov model [8]. Njegova pretpostavka da se EDL sastoji od jednog sloja para iona i naboja kao što je prikazano slici 3.1. Postojanje razlike potencijala između elektrode i poluvodiča će stvoriti EDL na mjestu gdje se dodiruju ionska tekućina i materijal. Ioni unutar tekućine utjecajem električnog polja se razdvajaju i privlače suprotni naboj unutar poluvodiča. Posljedica toga je da promjena potencijala u ionskoj tekućini je različita od dielektrika u čvrstom stanju. Promjena potencijala se događa u Helmholtzovom sloju koji je dimenzijski vrlo tanak (svega nekoliko Å) a ostatak ionske tekućine ima konstantan potencijal (slika 3.2 lijevo), za razliku od čvrstog dielektrika koji ima konstantnu promjenu potencijala (slika desno). Matematički model možemo opisati pomoću jednadžbe kapaciteta jednostavnog kondenzatora.

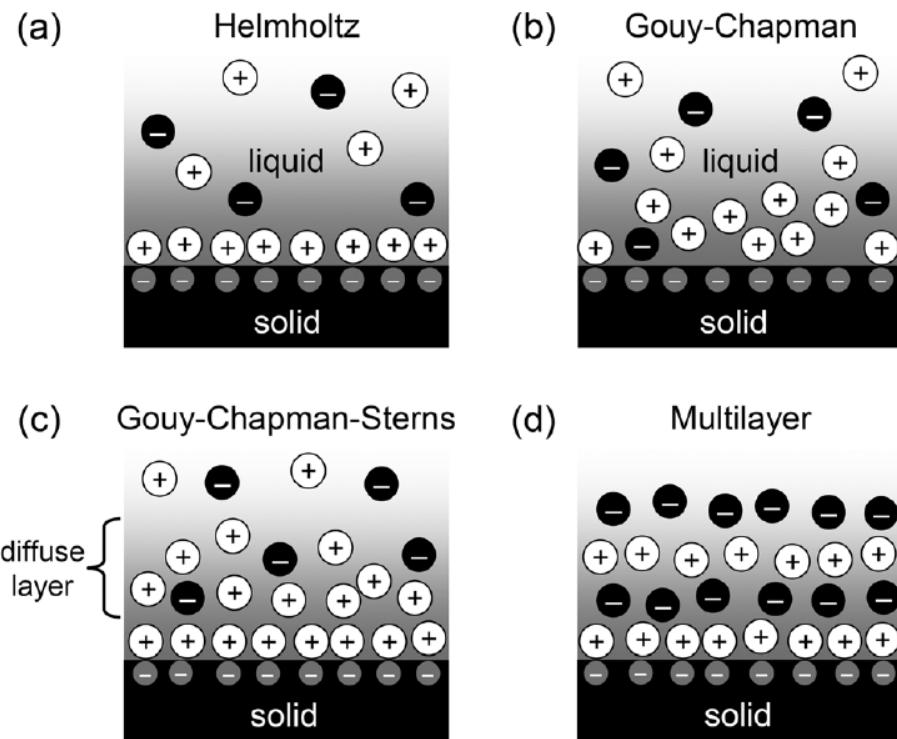


Slika 3.2: Promjena potencijala u dielektricima (preuzeto iz: [8])

Pojava EDL-a nam omogućava induciranje velikog broja nosioca naboja u materijalu. Odabir dielektrika za vrata tranzistora ovisi o cijeni, izdržljivosti, operacijskom vremenu i kapacitetu. Kapacitet uvelike određuje količinu induciranih naboja u kanalu poluvodiča. Ionske tekućine mogu poslužiti kao kondenzatori te su zbog toga na predmetu mnogih istraživanja. Pokazalo se da EDL može inducirati gustoću naboja reda veličine 10^{15} cm^{-2} što je veće od kemijskog dopiranja (10^{13} cm^{-2}) [11].

3.4 Ostali modeli

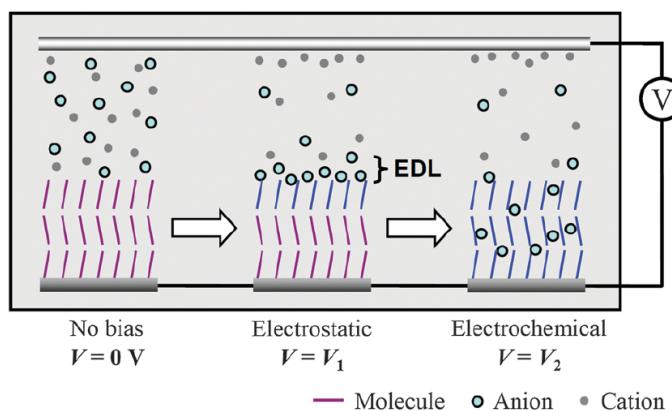
Ostali modeli pomoću kojih možemo opisati nastanak EDL-a prikazani su na slici 3.3. Modeli proširuju Helmholtzov model i uzimaju u obzir dodatne parametre kao što su difuzija i kompleksnije strukture tvari [8]. The Gouy–Chapman model (slika 3.3.b) uvodi difuziju u obzir i mijenja izgled potencijala (slika 3.2) na eksponencijalni oblik u području između spoja i ionske tekućine. Gouy–Chapman–Sterns model (slika 3.3.c) je spoj Helmholtzovog i Gouy–Chapman modela koji se sastoji od unutarnjeg helmholtzovog sloja (zvanog Stern sloj) i vanjskog difuznog sloja (Gouy–Chapman sloj). Pomoću njega moguće je opisati uobičajene elektrolite kojima su ioni jasno odvojeni i nema interakcije. Multilayer model slika 3.3.d ima Boltzmanovu distribuciju za raspored šupljina na spoju materijala i elektrolita. Najbolje opisuje eksperimentalne rezultate u odnosu na ostale modele, ali nijedan ne može u potpunosti reproducirati nastanak EDL-a.



Slika 3.3: Modeli nastanka EDL-a (preuzeto iz: [8])

3.5 Elektrokemijsko dopiranje

Pri velikim naponima vrata pojavljuje se nova vrsta dopiranja, elektrokemijsko. Ioni napuštaju ionsku tekućinu i prelaze u materijal te doprinose ukupnoj vodljivosti [8] [12]. Slika 3.4 prikazuje prodiranje iona ionske tekućine pri određenom naponu ($V < V_1 < V_2$). Posljednja istraživanja su otkrila da anioni ionskih tekućina su zaslužni za formiranje EDL-a koji s dovoljno velikim naponom mogu prodirati u materijal. Eksperimentalno je otkriveno da efikasnost injekcije aniona u materijal ovisi o polarizaciji i veličini aniona [8].



Slika 3.4: Elektrostatsko i elektrokemijsko dopiranje materijala (preuzeto iz: [8])

3.6 Nove mogućnosti i primjene

3.7 EDLC

Elektrostatsko dopiranje nam otvara mnoge mogućnosti u manipulaciji materijala. Ionske tekućine su zbog male molekularne mase i kemijske stabilnosti postale popularne i čest predmet istraživanja. Potencijalni kandidat su kao otapalo u električnim kondenzatorima dvostrukog sloja (eng. electric double layer capacitor) ili EDLC [9]. EDLC je energijski spremnik koji radi na principu formiranja električnog dvostrukog sloja između materijala i elektrolita. Uredaj (EDLC) sprema naboje fizički (kao kondenzator) te nema kemijskih procesa kao što je slučaj u današnjim punjivim baterijama [9]. Potencijalnu primjenu EDLC-a moguća je u hibridnim vozilima.

Današnji EDLC-i su osjetljivi na temperaturu pri kojoj radi uređaj. Primjerice visoka temperatura utječe na smanjenje broja ciklusa punjenja i pražnjenja, a niska na spremanje količine naboja i njegovog pražnjenja. Budući EDLC-i morat će imati svojstvo ne zapaljivosti i gustoću energije veću od današnjih litiskih baterija. Ionske tekućine su se pokazale kao potencijalni kandidat (primarno zbog njihove nezapaljivosti), te današnja istraživanja proučavaju mnoge izvedbe EDLC-a s različitim ionskim tekućinama. Posebno ćemo naglasiti istraživanje ionske tekućine N,N-Diethyl-N-Methyl-N-(2-Methoxyethyl) Amonium Tetrafluoroborate (skraćenog naziva DEME-BF₄) jer pomoću nje ćemo istraživati elektrostatsko dopiranje stroncijeva titanita. DEME-BF₄ je pokazala iznimna praktična svojstva kao EDLC. Pri temperaturi od 100°C pokazala je stabilnost kapaciteta (nije imala pad kapaciteta kao u ostalim elektrolitima). Pokazala je iznimnu izdržljivost u radnom okruženju tj. nakon 500 radnih ciklusa kapacitet EDLC-a je bio 15% manji od početnog kapaciteta.

Napomenimo da pri nižim temperaturama (ispod 40°C) pokazala je manju mogućnost spremanja kapaciteta u odnosu na ostale elektrolite. Razlog toga je u visokoj viskoznosti ionske tekućine. Unatoč svemu možemo zaključiti da DEME-BF₄ posjeduje kemijsku i temperaturnu stabilnost koja nam je potrebna u izradi i testiranju tranzistora. Druga istraživanja pokazala su da pojedine ionske tekućine imaju veći kapacitet na visokim temperaturama (većim od 40°C), a pojedine ionske tekućine na niskim temperaturama (pri -40°C) od klasičnih elektrolita. Također imale su veći broj radnih ciklusa i duži rad (više o tome u [9]).

3.8 Supravodljivost

Moderna istraživanja su pokazala da je moguće postići tranziciju u supravodič pomoću EDL-FET-a [8]. Postignuta je supravodljivost LaOBiS₂, KTaO₃ na kritičnim temperaturama $T_C = 3.6\text{ K}$ i $T_C = 50\text{ mK}$. Spomenimo samo da je postignuta supravodljivost izolatora STiO₃ na kritičnoj temperaturi $T_C = 0.4\text{ K}$ koji nam je predmet razmatranja u radu. Elektrostatskim dopiranjem pomoću ionske tekućine postignuta je supravodljivost na visokim temperaturama (180 K) na YBa₂Cu₃O_{7-x} tankom filmu. [13]. Prije nije bilo moguće dostići spomenute pojave zbog dielektričnog proboga vrata tranzistora pri velikim naponima.

4 Tijek izrade tranzistora

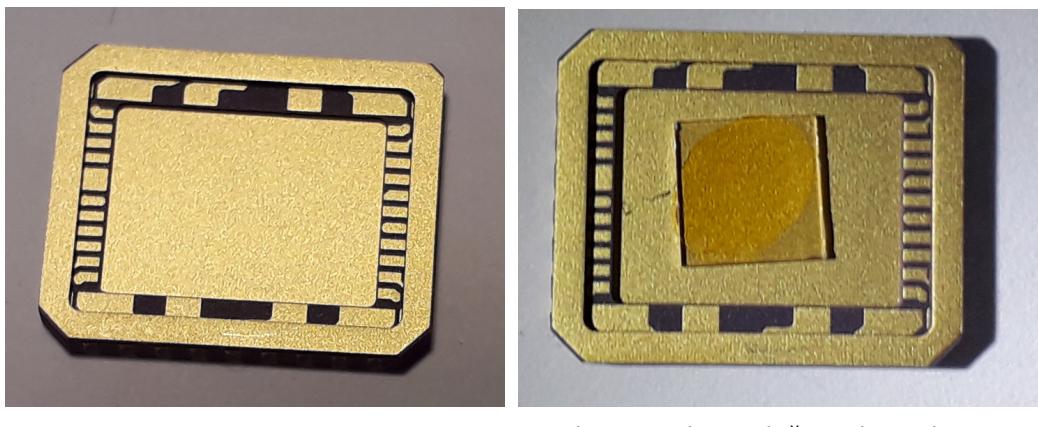
4.1 Priprema uzorka

Postupak izrade tranzistora s ionskom tekućinom se sastoji nekoliko koraka te zahtjeva preciznost i profesionalnu opremu. Započinjemo s izolatorom, točnije s listićem stroncija titanata (STiO_3). Pomoću ultrazvučne kade (slika 4.1) smo očistili nečistoće s uzorka.



Slika 4.1: Ultrazvučna kada

Sljedeće što radimo je lijepljenje izolatora na pločicu s kontaktima. Pločica s kontaktima je prikazana na slici 4.2a. Zadaća joj je da omogući pristup elektrodama prilikom mjerjenja te osigurava sigurnost elektroda jer su one zapravo žice aluminijskog sastava promjera $25\mu\text{m}$. Pomoću ljepila smo osigurali čvrsti spoj izolatora i pločice s kontaktima (slika 4.2b).



(a)

(b) Uzorak na pločici s kontaktima

Slika 4.2: Postupak lijepljenja uzorka s pločicom

4.2 Izrada elektroda i testiranje

Idući korak je izrada elektroda tranzistora. Koristit ćemo ih kao izvodnice na pločicu s kontaktima te pomoću njih ćemo pristupati pojedinim dijelovima tranzistora. Postupak spajanja elektroda je vrlo delikatan i nije ga moguće izvesti bez posebnog uređaja. Željeli smo postići što veću preciznost i bolji rad cijelog uzorka (budućeg tranzistora). Koristili HB05 Wire Bonder (slika 4.3) [14]. Uredaj koji ima mogućnost stvaranje kontakata ili veza (elektroda) između materijala. Podržava različite vrste žice i njihovih promjera. Za izradu elektroda korištena je žica od zlata promjera $25\mu m$. Koristili smo metodu zvanu *wedge bonding* koja stvara spoj na podlogu (izolator i kontaktna pločica) u obliku kuglice. Prvo su usklađeni parametri uređaja za stvaranje spoja na testnom uzorku. Konačne postavke *wedge bonding-a* su prikazane na slici 4.4.

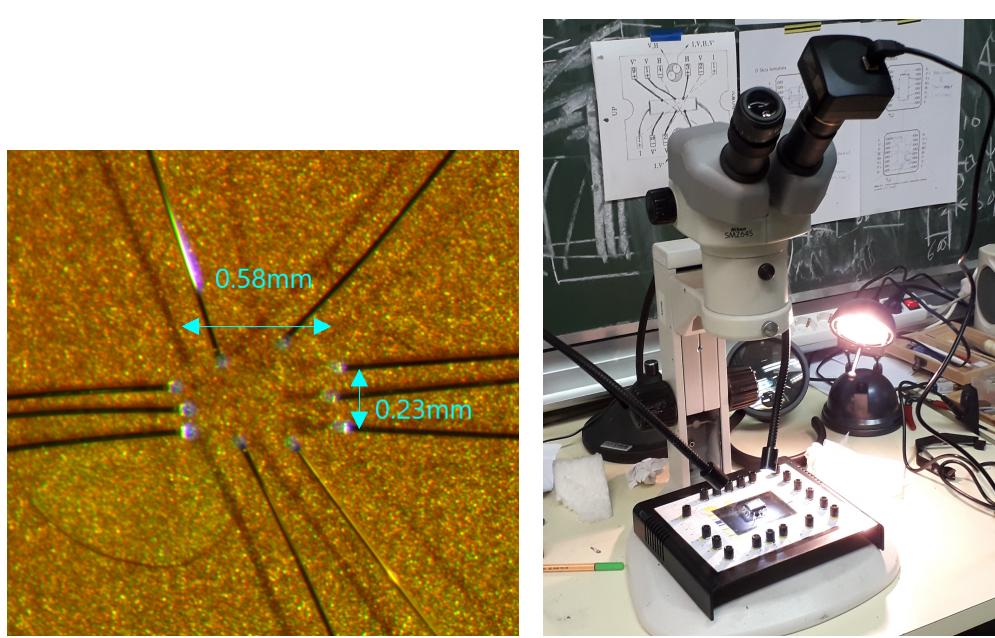


Slika 4.3: HB05 Wire Bonder



Slika 4.4: Postavke za "wedge bonding"

Slika uzorka s kontaktima i njegove dimenzije vidljiva je na slici 4.5a. Krajevi elektroda završavaju na kontaktima pločice. Zbog toga što su dimenzije uzorka vrlo male slike su dobivene pomoću posebne kamere spojene na mikroskop. Spomenuta slika prikazuje uzorak uvećan pet puta.

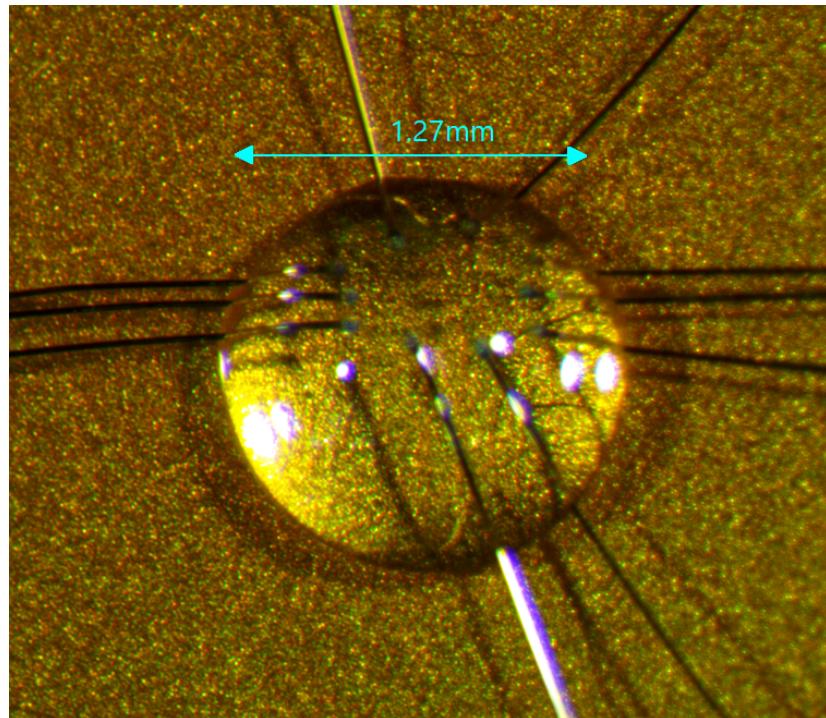


(a) izbliza

(b) prikaz slikanja

Slika 4.5: Slikanje uzorka pomoću mikroskopa i kamere

Mjerenja su pokazala da je uzorak izolator što je bila naša prvočna pretpostavka. Dokazali smo da kontakti nastali *wedge bonding*-om su ispravni. Nakon uspješnog testa uslijedio je korak kapanja ionske tekućine. Korištena je DEME-BF₄ ionska tekućina (slika 4.7). Kapanje ionske tekućine na uzorak smo radili pomoću mikro pipete. Promjer kapljice ionske tekućine je približno 1mm. Rezultat kapanja prikazan je na slici 4.6.



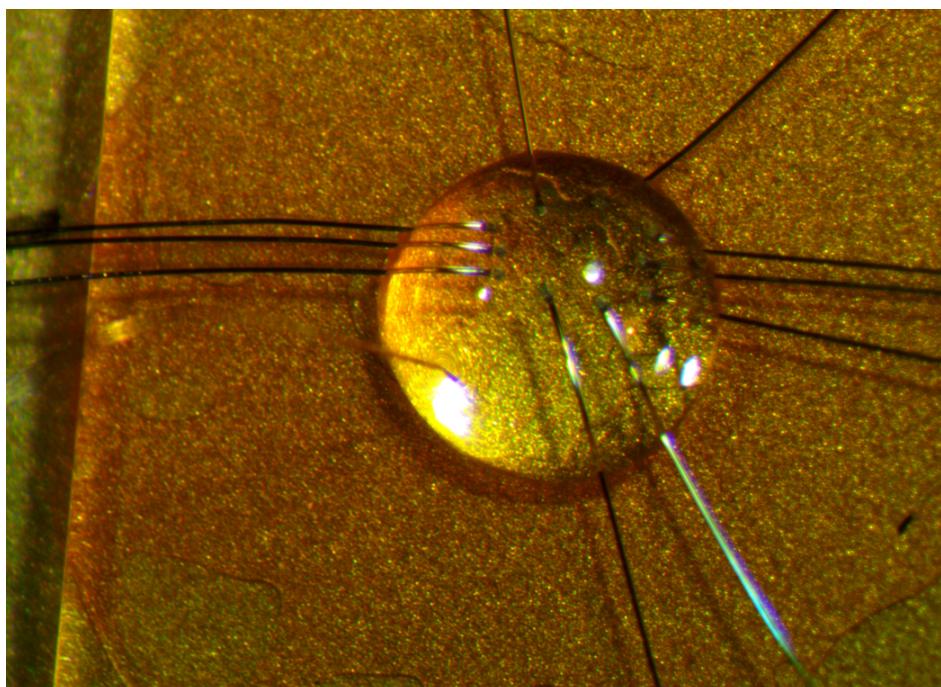
Slika 4.6: Postupak kapanja ionske tekućine na uzorak



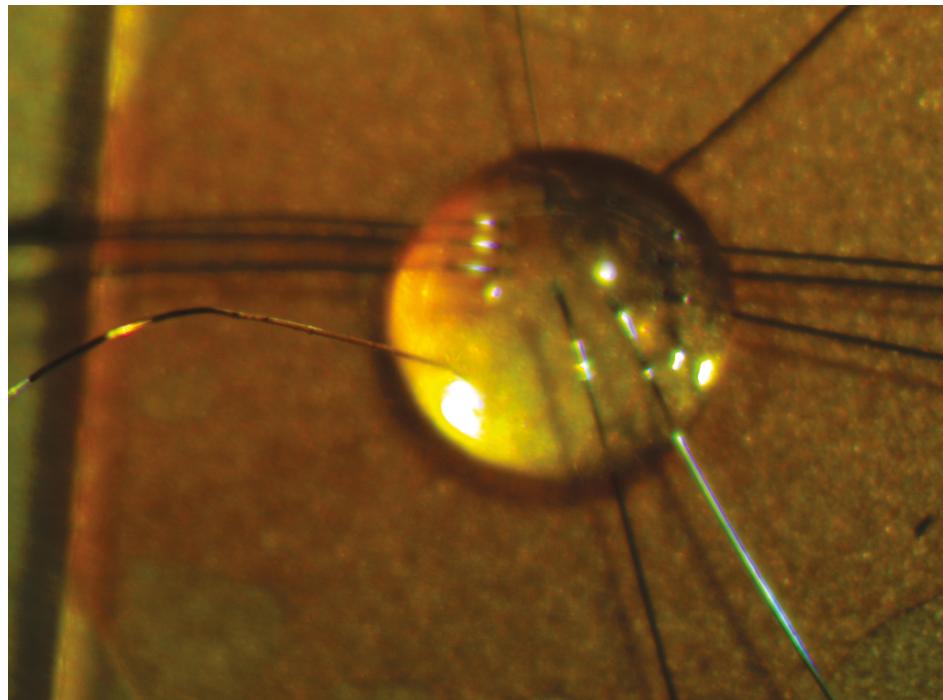
Slika 4.7: Uzorak ionske tekućine

4.3 Izrada vrata tranzistora

Želimo li postići pojavu EDL i tranziciju materijala u vodič potrebno je izraditi posebnu elektrodu koja će imati ulogu vrata tranzistora. Umetanjem elektrode u ionsku tekućinu a da pritom ne dotakne izolator postižemo da elektroda ima ulogu vrata tranzistora. Efekt smo postigli pomoću žice od platine koja probija kapljicu ionske tekućine. Slike 4.8 i 4.9 prikazuju uzorak nakon postavljanja elektrode. Možemo primjetiti na slici 4.8 mjesto gdje elektroda probija ionsku tekućinu.



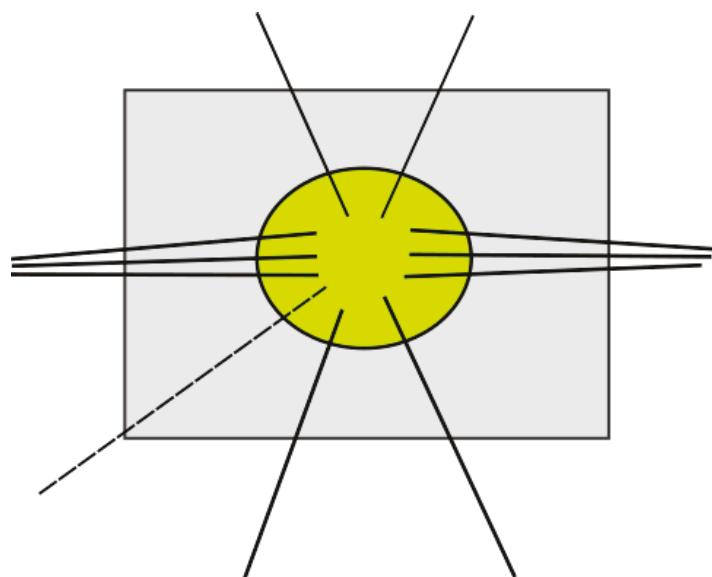
Slika 4.8: Snimka uzorka nakon postavljanja elektrode



Slika 4.9: Snimka elektrode na uzorku

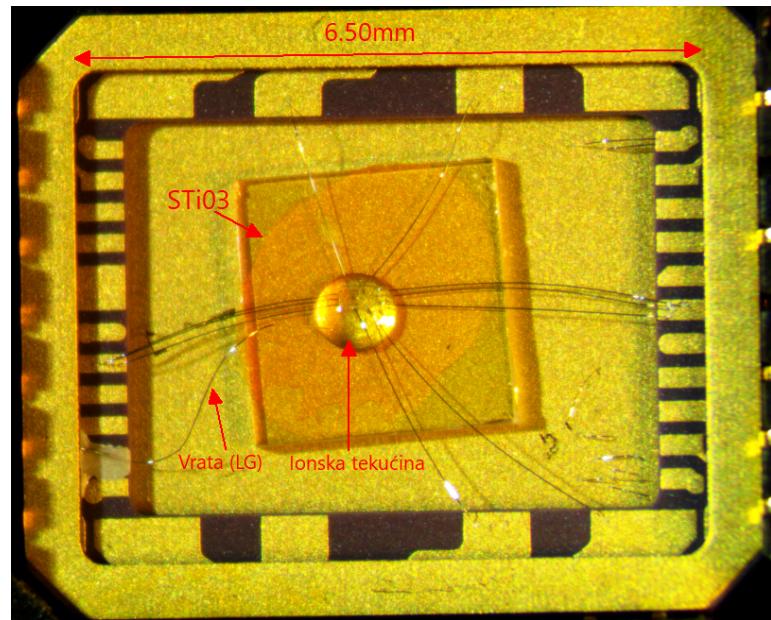
4.4 Konačan uzorak i postav

Izrada elektroda i njena pozicija u uzorku izrađena je po uzoru na sliku 4.10. U sredini zelenom bojom označena je kapljica ionske tekućine, a sivi pravokutnik je izolator (STiO_3). Linije prikazuju elektrode koje ulaze u ionsku tekućinu. Topologija je preuzeta iz članka [15]. Razlog odabira topologije je što želimo imati dva kontakta namijenjena za mjerjenje struje, a ostala četiri su naponska te sredina uzorka će biti kanal kojem će teći nosioci naboja. Isprekidana linija prikazuje elektrodu koja će imati ulogu vrata uzorka.



Slika 4.10: Topologija uzorka

Konačan izgled uzorka prikazan je na slici 4.11, gdje su prikazani svi važni dijelovi. Primijetimo da možemo vidjeti kojim kontaktima na pločici pripadaju pojedine elektrode.



Slika 4.11: Konačan izgled uzorka

Preostalo je spojiti sklop (uzorak + pločica s kontaktima) na mjerni postav te vršiti mjerjenja. Spojit ćemo ga tako da sklop spajamo na eksperimentalnu ploču (slike 4.12), odnosno sklop ide u ležište koje se nalazi u sredini eksperimentalne ploče. Koristit ćemo ulaze na eksperimentalnoj ploči koji su spojeni s kontaktima na pločici. Pomoću eksperimentalne ploče moći ćemo pristupiti kontaktima uzorka te sigurnije rukovanje prilikom mjerjenja.



Slika 4.12: Eksperimentalnu ploču

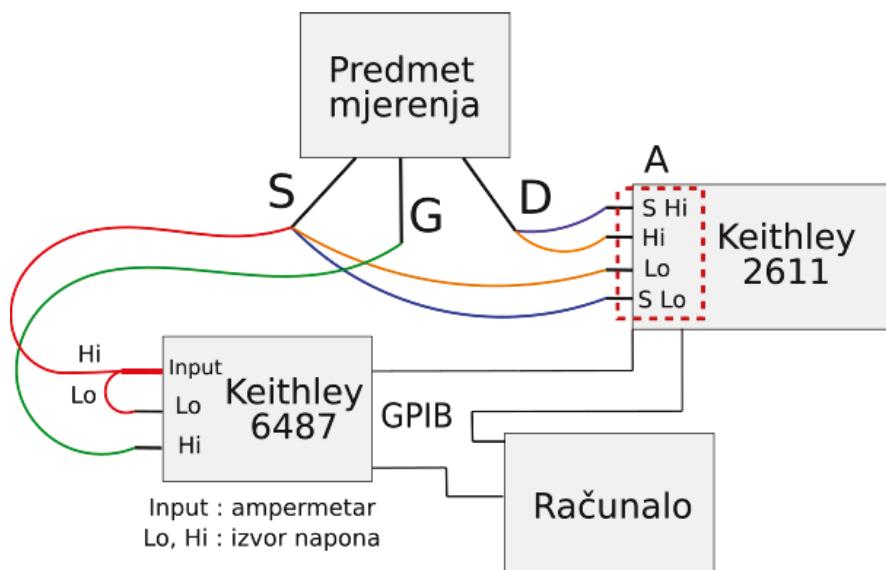
5 Mjerni postav

5.1 Uvod

Nakon izrade tranzistora slijedi testiranje i mjerjenje. Pokušati ćemo mjernim postavom otkriti karakteristike uzorka. Odnosno je li slična karakteristici tranzistora, te koje su moguće sličnosti i razlike. Za početak biti će nam potreban testni tranzistor u odnosu na kojeg ćemo uspoređivati mjerena uzorka. Koristit ćemo unipolarni tranzistor JFET K246 [16]. Karakteristike tranzistora kao i razlog njegova odabira ćemo se dotaknuti u narednim stranicama. Postupak mjerena će biti isti za testni tranzistor i uzorak. Proučiti ćemo dijelove mjernog postava, karakteristike i svojstva instrumenata te programsko okruženje. Osim toga detaljno ćemo proučiti samu logiku vršenja mjerena te obrazložiti zašto je korištena. Započeti ćemo s pojedinim dijelovima mjernog postava i načinom mjerena.

5.2 Općeniti postav

Općenitu shemu mjernog postava možemo vidjeti na slici (5.1).



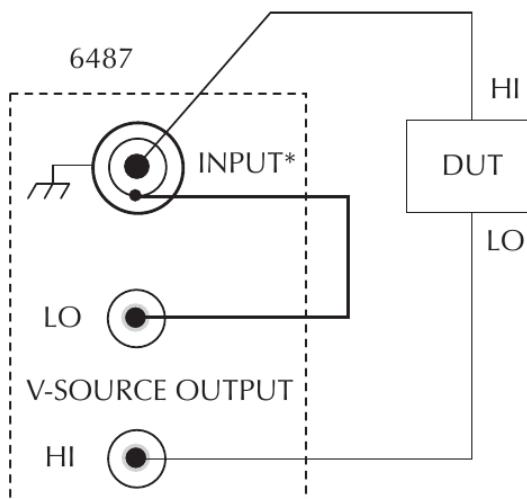
Slika 5.1: Shema mjernog postava

Mjerni postav se sastoji od dva instrumenta (Keithley 2611 i 6487) [17] [18], računala i predmet mjerena. Predmet mjerena je uzorak ili testni tranzistor, te on ima tri izvodnice (source S, drain D i gate G) koji reprezentiraju izvor, odvod i vrvata tranzistora. Na svaku pojedinu izvodnicu spajaju se instrumenti. Instrumenti su spojeni s računalom i međusobno pomoću GPIB sabirnice (eng."General Purpose Interface Bus"). Iako GPIB potječe iz 60-ih godina prošlog stoljeća, danas je najčešće korišteni standard digitalne komunikacije instrumenata s računalom.

Ulazi A (crveno uokvireni pravokutnik) na Keithley 2611 se sastoji od para stružnih i para naponskih kontakata (S Hi, S Lo, Hi i Lo) koje spajamo na S i D predmeta mjerena (plave i narančaste crte). Pomoću njih mjerni instrument može mjeriti struju i napon između elektroda. Ulaz Lo i Hi su kontakti izvora napona pomoću kojeg postavljamo napon vrata tranzistora. Ulaz Input služi nam za mjerjenje struje vrata. Ulaz je izведен pomoću koaksijalnog kabela koji se sastoji od Lo i Hi ulaza. Predmet mjerena spajamo s Keithley 6487 mjernim instrumentom po uzoru na shemi u dokumentaciji (5.2). Primijetimo da ulazi Lo od ampermetra i izvora napona su međusobno spojeni. Razlog korištenja spomenute komunikacije je u programskom paketu koji će nam omogućiti izravnu komunikaciju i upravljanje s instrumentima (LabView). Njegovo korištenje ćemo pojasniti u narednim stranicama. Mjerjenjem ćemo utvrditi I_D - V_{DS} karakteristiku, odnosno promjenu struje odvoda u odnosu na promjenu napona između odvoda i izvora pri konstantnom naponu vrata (V_{GS}). Mjerjenjima ćemo pokušati utvrditi našu pretpostavku koja je da uzorak ima karakteristiku slično kao i testni tranzistor. Odnosno da smo postupkom izrade napravili uzorak koji ima mogućnosti rada tranzistora. Oba mjerna instrumenta mogu se koristiti kao izvori napona i/ili ampermetar.

5.3 Keithley 6487

Keithley 6487 mjerni uređaj koji (slika 5.3) ima mogućnost mjerjenja vrlo malih struja reda veličine 1pA. Njegova primarna funkcija je izvor napona za vrata tranzistora. Osim toga koristit ćemo ga kao ampermetar za mjerjenje struje koja protječe kroz vrata tranzistora (I_G) gdje očekujemo struje vrlo malih vrijednosti. Instrument pomoću ulazne signale prima pomoću triax konektora. Konektor se sastoji od tri dijela. Naime kako instrument ima ulogu izvora napona i ampermetra istovremeno, spajanje u mjerni postav nije uobičajeno. Slika 5.2 opisuje shemu spajanja prilikom mjerjenja.

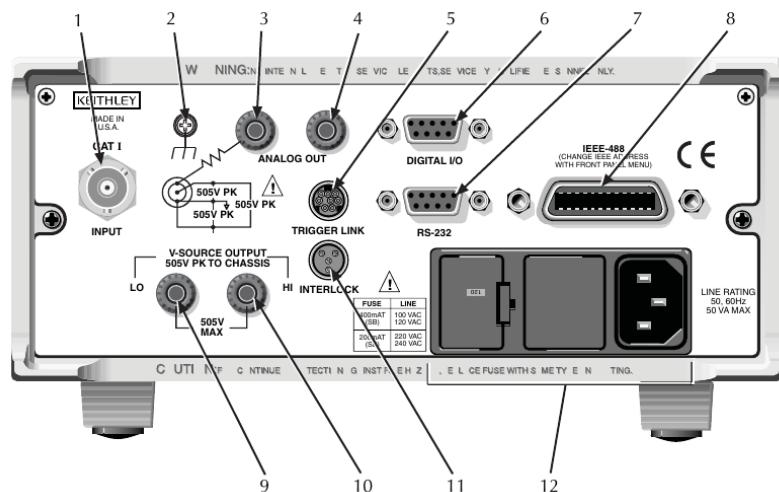


Slika 5.2: Spajanje mjernog instrumenta (preuzeto iz: [17])

Ulazi lo i hi su ulazi izvora napona dok ulaz input je zadužen za mjerjenje ulazne vrijednosti, tj. struje. Oznaka DUT (eng. device under test) je predmet mjerjenja. Pomoću slike 5.2 smo spojili dio postava opisanog u generalnoj shemi (slika 5.1). Na slici 5.4 možemo vidjeti pristupne kontakte za ulaze instrumenta, triax konektora, napajanja i GPIB sabirnice. Instrument podržava mogućnost vanjskog okidača signala (eng. trigger), RS-232 komunikacije te analogne i digitalne ulazno izlazne jedinice.



Slika 5.3: Keithley 6487 mjerni uređaj



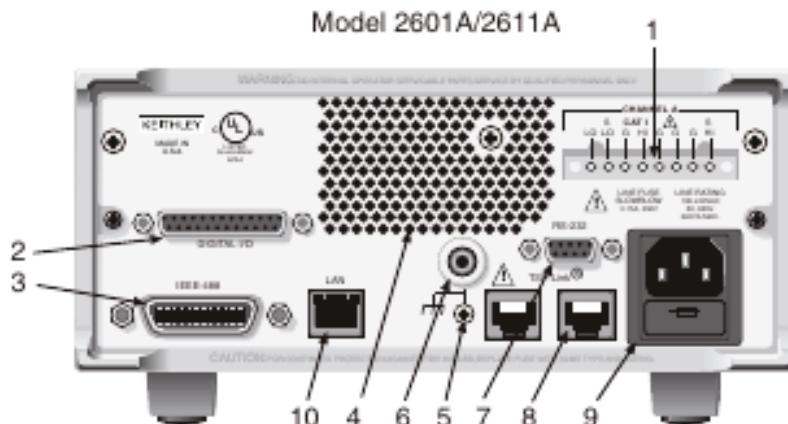
Slika 5.4: Zadnja strana instrumenta (preuzeto iz [17])

5.4 Keithley 2611

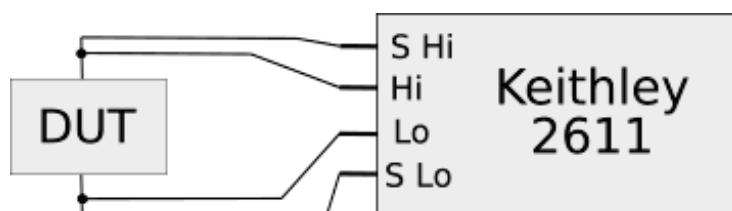
Mjerenje I_D-V_{DS} ćemo vršiti pomoću Keithley 2611 mjernog uređaja (slika 5.5). Njegova primarna uloga će biti mjerjenje struje odvoda pri promjeni napona između odvoda i izvora (V_{DS}). Osim toga koristit ćemo ga zbog njegove funkcije ograničenja struje što nam pogoduje za zaštitu uzorka prilikom mjerjenja. Posjeduje mogućnost spremanja određenog broja mjerena, njegove obrade i slanja podataka u računalo. Kanal A na pozadini instrumenta (slika 5.6) je ulazno/izlazna jedinica instrumenta te pomoću nje se spajamo na mjerni postav i s predmetom mjerjenja. Mjerni instrument spajamo u postav po uzoru na slici 5.7, gdje nam S Hi i S Lo predstavljaju naponske ulaze, a Hi i Lo strujne ulaze instrumenta. Osim toga nalaze se i konektori napajanja, LAN, IEEE-488 (GPIB) i RS-232 komunikaciju, TSP-Link za komunikaciju s drugim uređajima te digitalnu ulazno/izlaznu jedinicu.



Slika 5.5: Keithley 2611 mjerni uređaj



Slika 5.6: Zadnja strana instrumenta (preuzeto iz [18])



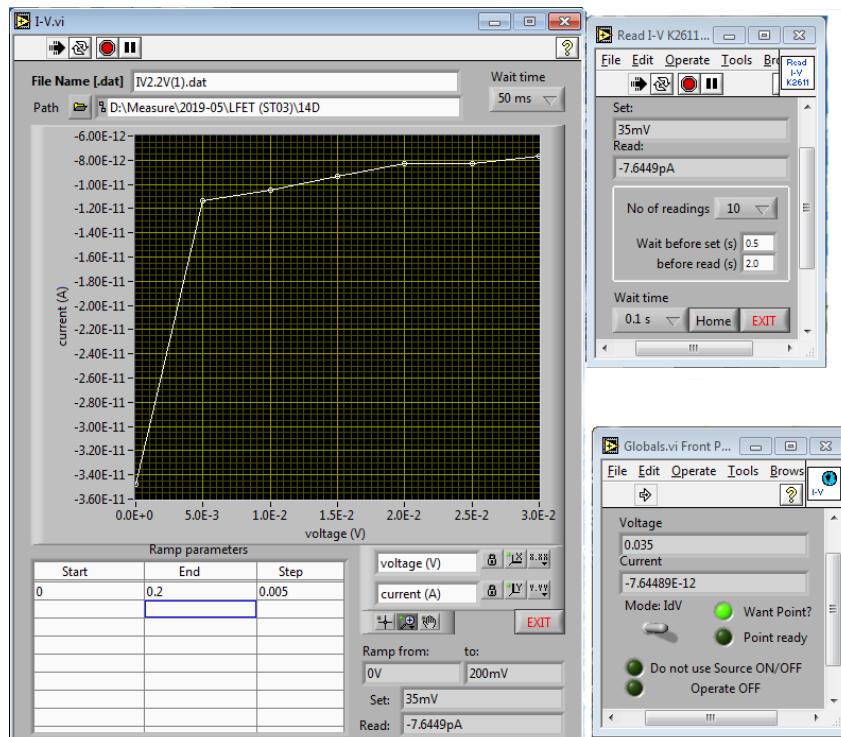
Slika 5.7: Spajanje mjernog instrumenta

5.5 LabView programski paket

Korištenje mjernog postava opisanog u prijašnjim stranicama nam omogućava veliku preciznost prilikom mjerena jer koristimo profesionalne instrumente s mogućnošću spremanja podataka i njihove obrade. nude mogućnosti proširenja, komunikaciju s drugim instrumentima, ali i s računalom. Potreban nam je alat da obrađene podatke "dohvatimo" i spremimo u računalo u obliku datoteke. Koristit ćemo programski paket *Labview*. Često korišteni alat u znanstvenoj zajednici. Nudi mogućnost izrade "virtualnih" instrumenata koji komuniciraju sa stvarnim instrumentima. Virtualni instrumenti se sastoje od korisničkoga sučelja i logike iza nje.

Korisničko sučelje omogućava korisniku da postavlja određene parametre, analizira rezultate mjerena i odabire mogućnosti programa. Logika je mozak iza korisničkog sučelja, ona komunicira s instrumentom i mijenja ponašanje instrumenta (ili više njih) u ovisnosti o unesenim parametrima. Programski paket nudi veliku mogućnost i potpunu slobodu u izradi virtualnih mjernih instrumenata proširujući time mogućnosti postojećih stvarnih instrumenata.

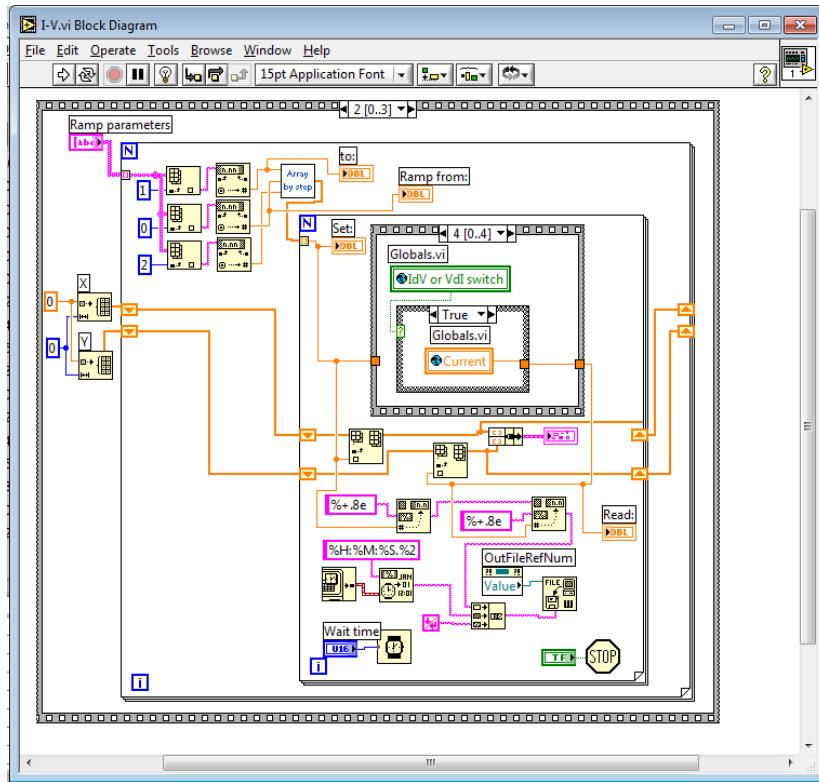
Programski paket će nam omogućiti da mjerimo struju i napon eksperimentalnog postava većom preciznošću, brzinom i točnošću. Izvedba mjernog postava bez programskog paketa bi produžila vrijeme mjerena, uvela ljudski faktor nepreciznosti očitavanja vrijednosti. Korisničko sučelje prikazano je na slici 5.8 i sastoji se od tri prozora. Najveći prozor, imenom "*I-V.vi*" nudi mogućnost grafičkog prikaza podataka u realnom vremenu (crtanje grafa tijekom mjerena). Osim toga nudi unos parametara kao što su granične vrijednosti napona (stupci "*Start*", "*End*") i korak mjerena.



Slika 5.8: Interaktivni virtualni mjerni postav

Logika prozora dohvaća podatke te ih prikazuje na ekran i sprema u datoteku.

Također imenovanje datoteke i njezino mjesto spremanja. Prozor imena "Read I-V.vi" je zadužen za očitavanje mjernih vrijednosti i obradu konačnog rezultata. Njegova logika omogućava da uzima skup podataka koje instrument izmjeri u kratkom vremenskom intervalu, izračunava srednju vrijednost te time smanjuje mogućnost šuma prilikom mjerjenja. Konačni podatak šalje u glavni prozor ("I-V") gdje se vrijednost spremi u datoteku i prikazuje na grafu. Korisnik ima mogućnost odabira broj mjerjenja u jednom skupu te dodatne parametre kao vrijeme čekanja svakog mjerjenja i vrijeme čekanja pojedinog očitavanja mjerjenja na mjernom instrumentu. Posljednji prozor imena "Globals.vi" služi kao globalni prozor za sve virtualne instrumente. Pomoću njega se postavljanju globalne varijable i komunikacija između instrumenata. Primijetimo da svaki prozor u njegovom imenu ima format ".vi" što označava "virtual instrument".



Slika 5.9: Blok dijagram programskog rješenja

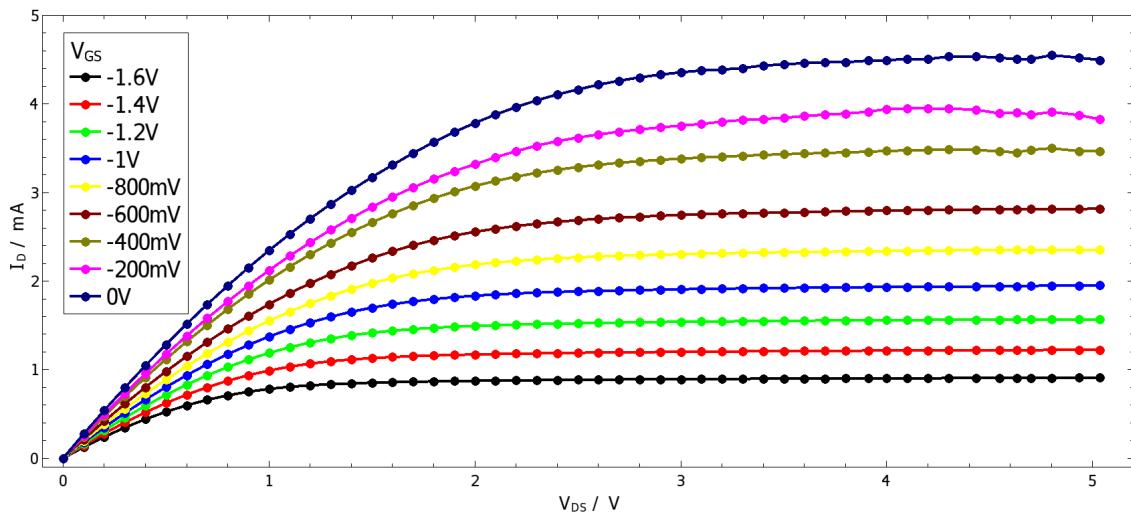
Izrada korisničkoga sučelja je intuitivna i vizualnoga je karaktera gdje se grafički elementi mogu dodavati povlačenjem na željeni prozor (eng. *"drag and drop"*). Pisanje logičkog dijela zahtijeva razumijevanje osnovnih logičkih operacija, grananje i uvjeti. Slijed programa se događa u okvirima (eng. *"frames"*) koji unutar sebe mogu imati pojedine uvijete da se izvršavaju ili ne. Slika 5.9 prikazuje logiku iza jednog prozora. Prednost i mana mu je što su vizualnoga oblika (ne piše se programski kod osim u posebnim slučajevima) jer omogućava lakšu izradu ali i mogućnost nečitljivosti ukoliko programski kod se neplanirano proširuje.

Programski paket LabView nam nudi velike mogućnosti pristupa i rješavanju problema izrade mjernog postava i nezaobilazan je alat u modernoj znanstvenoj eksperimentalnoj zajednici. Pomoću njega mjeriti ćemo karakteristiku unipolarnog tranzistora i pokazati na primjeru sve istaknute karakteristike i prednosti.

5.6 JFET K246

Proučavamo karakteristiku unipolarnog tranzistora K246 te nam on služi kao testni primjerak rada tranzistora. Pomoću njega ćemo isprobati mjerni postav te rad svih instrumenata. Također komunikaciju instrumenata s programskim rješenjem. Koristit ćemo mjerni postav opisan u slici 5.1, te će nam predmet mjerjenja biti JFET K246. Mjerjenje struje koja prolazi kroz odvod (I_D) vršimo pomoću Keithley 2611, osim toga pomoću njega ćemo mijenjati napon odvoda i izvora (V_{DS}), a pomoću Keithley 6487 ćemo postaviti vrijednost napona vrata.

Koristit ćemo programsko rješenje (opisan u prošlom poglavlju) koje će nam omogućiti međusobnu komunikaciju između računala i instrumenata te tako slati mjerne podatke računalu. Cilj mjerjenja je izmjeriti I_D - V_{DS} karakteristiku JFET-a. Postavljamo stalni napon vrata. Mijenjajući napon V_{DS} mjerimo struju koja prolazi kroz odvod (I_D). Mjerena za svaki napon vrata spremamo u posebnu datoteku. Raspon napona V_{DS} je od 0V do 5V s koracima od 0.1V. Pomoću QTiplota ih zajedno crtamo na graf. Rezultati mjerjenja su prikazani na slici 5.10.



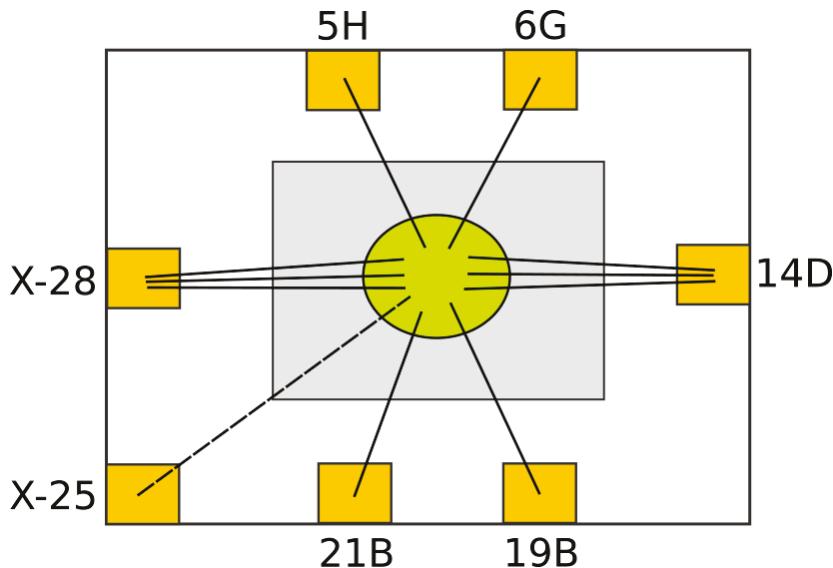
Slika 5.10: Naponska karakteristika JFET-a K246

Slika prikazuje rad tranzistora. Graf možemo podijeliti na područje zasićenja, aktivno te zaporno. Područje zasićenja se nalazi desno od osi apscise, prepoznatljivo je zbog struja odvoda koja ima stalne vrijednosti za različiti V_{DS} . Aktivno područje se nalazi na početku grafa i sugerira nam da struja odvoda raste s naponom V_{DS} . Zaporno područje se nalazi ispod najniže krivulje, sugerira na rad tranzistora kao beskonačnog otpornika kroz kojeg ne teče struja.

Primijetimo da struja odvoda raste s promjenom naponom na vratima. Odnosno što je manja absolutna vrijednost napona V_{GS} to je veća struja odvoda I_D . Područje zasićenja se javlja vrlo brzo i struja odvoda je konstanta. Ideja mjerjenja je da prikažemo rad tranzistora te ćemo njegove karakteristike usporediti s uzorkom (tranzistorom izrađenim u 4 poglavlju). Iskoristili smo tranzistor kao "pokusni kunić" u testiranju mjernog postava. Ukoliko postoji greška u mjernom postavu grube prirode (krivo spojeni instrumenti ili slično) mogli bi negativno utjecati na rad izolatora.

6 Rezultati mjerena

Mjerenje vršimo slično kao za JFET K246. Za svaku promjenu napona na vratima (V_{LG}) mjerimo struju odvoda I_D u odnosu na promjenu napona V_{DS} . Razlog imenovanja napona vrata u V_{LG} umjesto V_{GS} je u prirodi izrade tranzistora jer vrata tranzistora je ustvari ionska tekućina. Podsjetimo se da smo spojili uzorak na eksperimentalnu ploču što nam omogućava lakšem pristupu pojedinim elektrodama uzorka (opisanom u 4. poglavljju). Koristit ćemo određene ulaze eksperimentalne ploče za mjerjenje. Provjerom spojeva na eksperimentalnoj i ploči s kontaktima utvrđena je shema kontakata (slika 6.1). Također za svaki napon vrata mjerimo struju koja teče kroz vrata, nju ćemo nazvati strujom I_G .



Slika 6.1: Shema kontakata uzorka i eksperimentalne ploče

Proučavat ćemo karakteristike tranzistora (graf I_D-V_{DS}) za različite kontakte na eksperimentalnoj ploči. Mijenjat ćemo "uloge" pojedinim kontaktima. Primjerice kontakt X-28 će imati ulogu izvora (S), a kontakt 5H ulogu odvoda (D). Proučavat ćemo i analizirati grafove za pojedine kombinacije kontakta. Vrata tranzistora za sve karakteristike će biti na X-25. Razlog tome je što pri izradi specijalna elektroda (žica od platine) postavljena iznad kanala tranzistora i spojena na spomenuti kontakt. Probnim mjeranjima smo odredili granice raspona vrijednosti za napon V_{DS} koji je od 0V do 0.2V, te ćemo mjeriti pri koracima od 5 mV. Gornju granicu napona vrata V_{LG} pri kojoj ćemo vršiti mjerena je 3V. Razlog tome je u mogućoj nestabilnosti iona u ionskoj tekućini pri većim naponima (sugerirano u članku [19]).

Rezultate mjerenaćemo podijeliti u dvije skupine s obzirom na kontakt izvora:

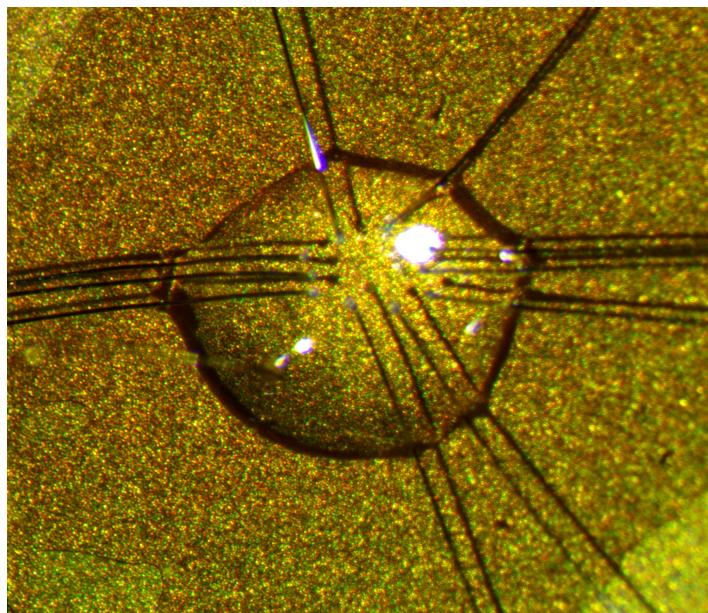
1. Izvor: X-28

2. Izvor: 14-D

Navedene kontakte koristimo kao izvore zbog načina njihove izrade. Sastoje se od tri elektrode (u odnosu na jednu kod ostalih kontakata) što pospješuje homogenosti struje (opisano u podpoglavlju 5.2). Osim I_D - V_{DS} karakteristike mjeritićemo struju vrata I_G pri svakoj vrijednosti napona vrata V_{LG} . Namjera nam je usporediti iznose struja I_G i I_D pri svakom naponu V_{LG} u pojedinoj konfiguraciji kontakata. Pomoću njećemo moći uvidjeti dugotrajnost ponašanja uzorka kao tranzistor.

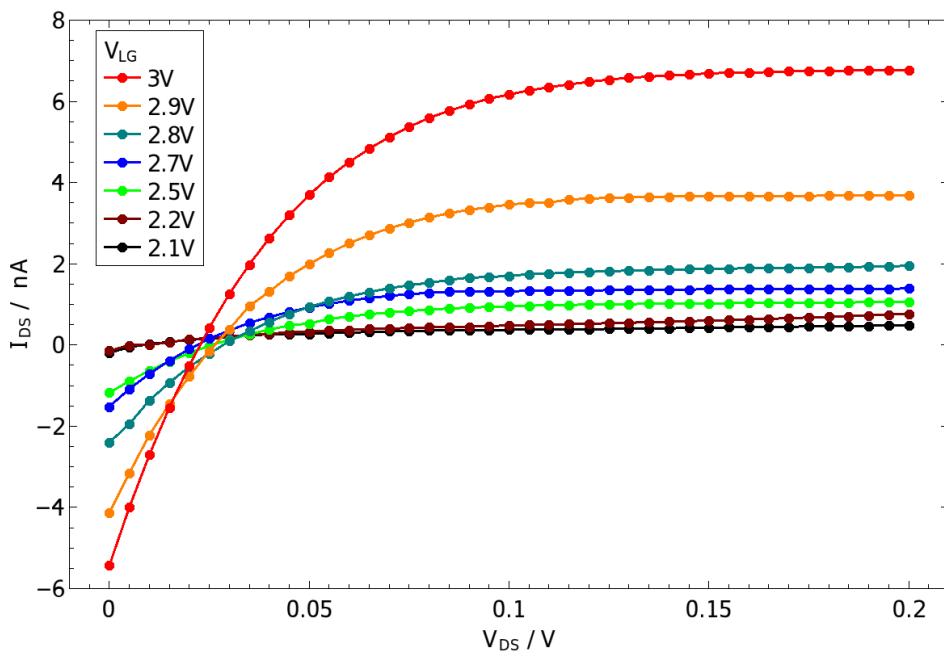
6.1 Izvor X-28

Prva mjerena su izvršena na kontaktima X-28 i 21-B kao izvor i odvod (drain, source). Nakon prvog mjerena primijećena je promjena uzorka. Kapljica ionske tekućine je promijenila oblik (slika 6.2), više nije sfernoga oblika (za razliku od slike 4.6) te se izobličila u smjeru elektroda.

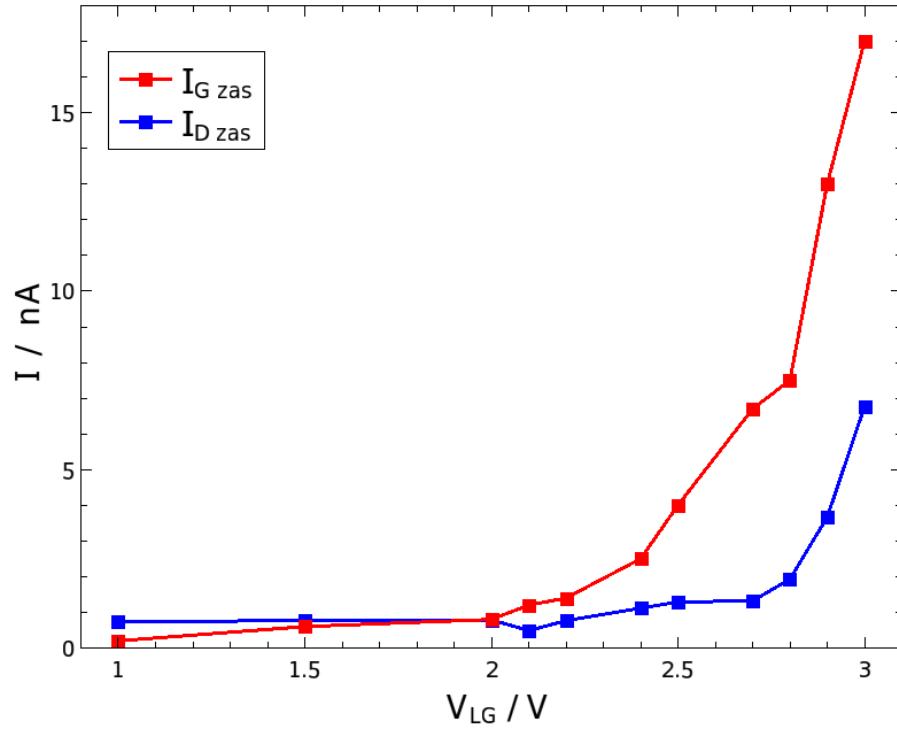


Slika 6.2: Uzorak nakon prvog mjerena

Rezultate mjerenaćemo vidimo na slici 6.3. Usporedimo li ga s mjeranjima JFET-a K246 (slika 5.10) možemo primijetiti da uzorak ima karakteristiku rada tranzistora. Primijetimo da područje struje odvoda I_D je u nA za razliku od K246 koja je mA. Uobičajeno je da u elektronici se struje područja nA zanemaruju, ali u ovom slučaju to nećemo učiniti jer možemo primijetiti da graf ima karakteristiku rada tranzistora. Također početne vrijednosti struje odvoda su negativne, većim naponom V_{DS} postaju manje negativne i prelaze u pozitivno područje. Možemo primijetiti da skok porasta struje odvoda se pojavljuje za napon na vratima većim od 2.5V. Što je veći napon na vratima to je više negativna početna vrijednost struje I_D .



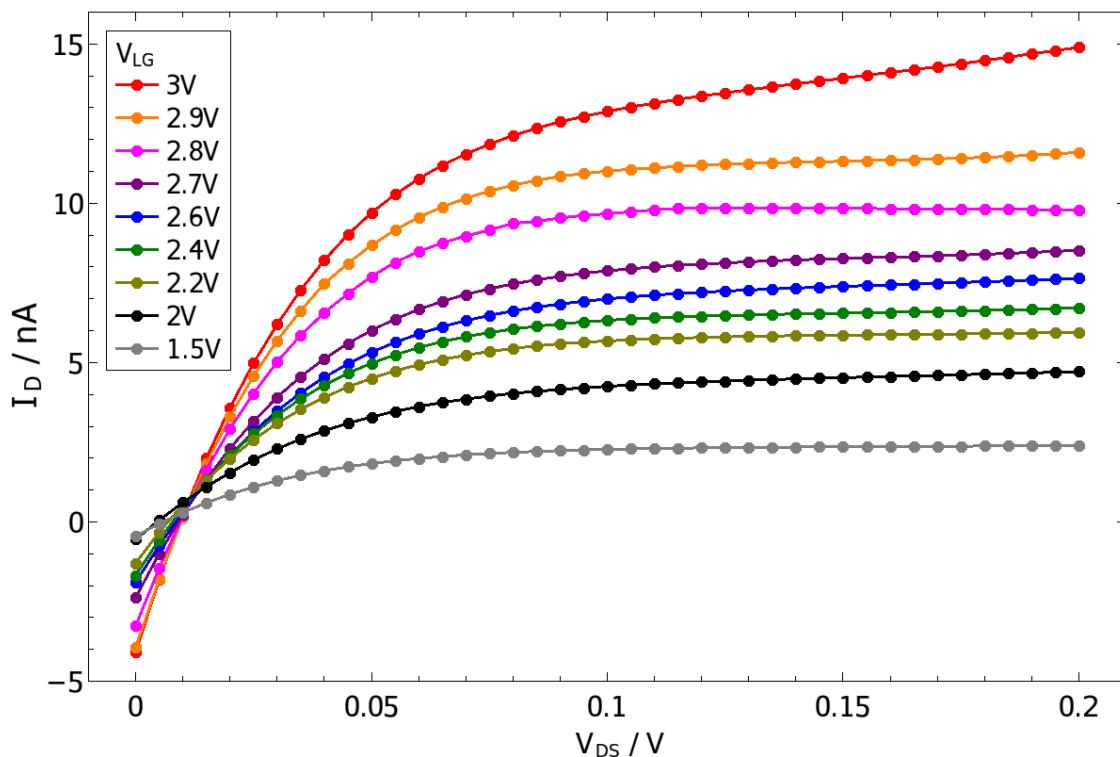
Slika 6.3: Karakteristika tranzistora za izvor na X-28 i odvod na 21-B



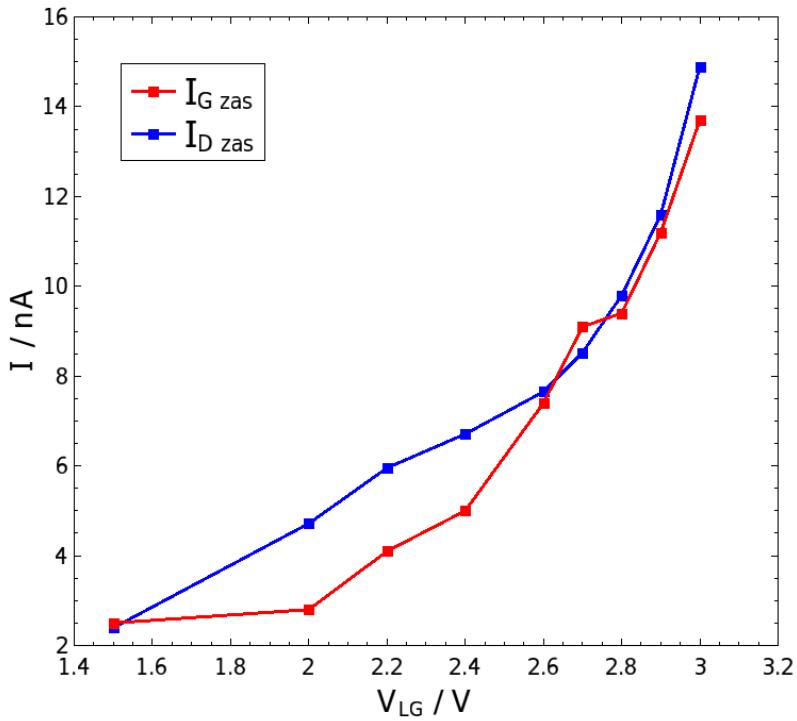
Slika 6.4: Odnos I_G i I_D za izvor na X-28 i odvod na 21-B

Osim karakteristike mjerili smo struju koja teče kroz vrata I_G . Mjerena je u trenutku kad struja odvoda je bila u stanju zasićenja, te struju I_G možemo nazvati strujom I_{Gzas} . Razlog mjerjenja u tom posebnom dijelu je što početna struja vrata je jako velika i ona se s vremenom smanjuje. Uzrok tome je tromost iona u ionskoj tekućini prilikom formiranja EDL-a. Sljedeća slika (6.4) prikazuje odnos struja I_{Dzas} i I_{Gzas} pri različitim naponima vrata. Struja koja teče kroz vrata je veće vrijednosti u odnosu na struju kroz odvod (otprilike dva puta veća). Činjenica da je struja I_G veća od struje I_D nam govori da većinska struja teče kroz vrata tranzistora, a ne kroz izvor i odvod. Pojavljuje se struja "curenja" (eng. *leakage current*).

Sljedeća slika prikazuje karakteristiku tranzistora pri odvodu na kontaktu 5H (slika 6.5). Primijetimo da je područje struje odvoda isto u nA, ali vrijednosti su veće nego na kontaktu 21-B. Karakteristika je slična, ima isti oblik kao kod prethodnog kontakta. Posljedica veće struje odvoda se primjećuje na slici 6.16 gdje ju uspoređujemo sa strujom I_G . Struja I_{Dzas} je malo veća (osim pri $V_{LG} = 2.7V$). Usporedimo li udaljenosti odvoda i izvora za obje konfiguracije, udaljenost između 5H i X-28 je manja od udaljenosti 21-B i X-28. Lako moguće da udaljenost kontakta utječe na samu karakteristiku rada tranzistora i veću struju odvoda.

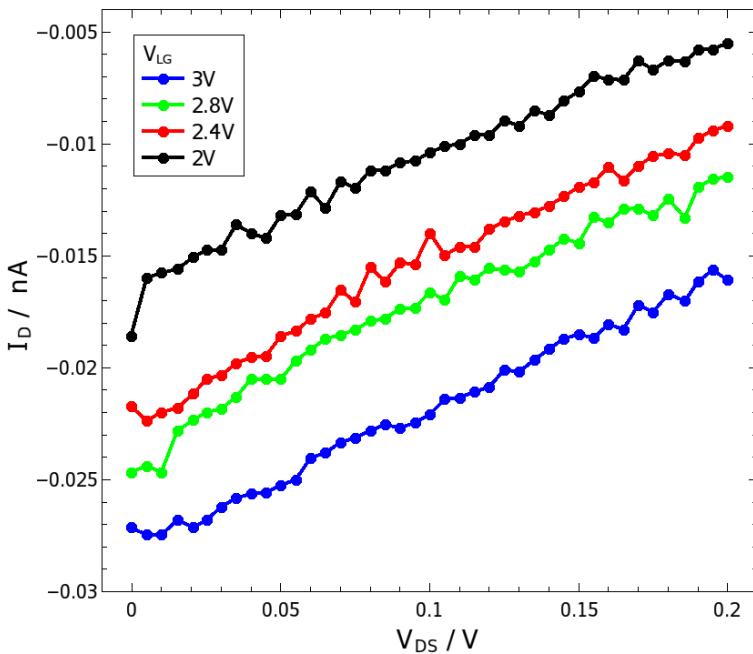


Slika 6.5: Karakteristika tranzistora za izvor na X-28 i odvod na 5H

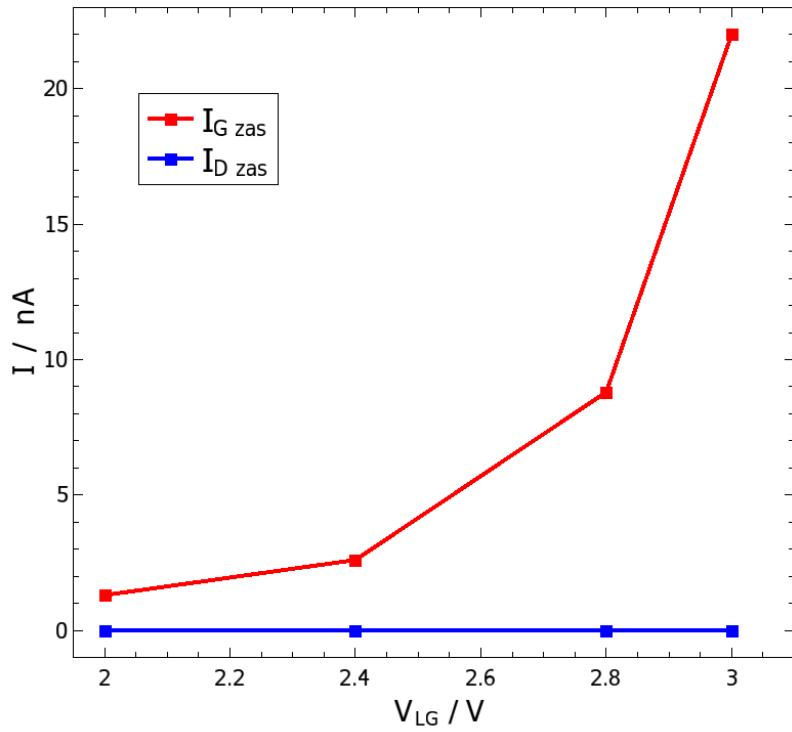


Slika 6.6: Odnos I_G i I_D za izvor na X-28 i odvod na 5H

Postavljamo kontakte odvoda na 19B. Slika 6.7 nam prikazuje karakteristiku tranzistora. Struja I_D je negativna i ne pokazuje oblik karakteristike kao kod prošlih. Možemo primijetiti linearno ponašanje te zaključujemo da se cijeli sklop ponaša kao izolator. Struja I_G ima sličan oblik kao kod prošlih konfiguracija (slika 6.8) pri čemu je struja I_D jako malena. Zbog linearног ponašanja karakteristike vrijednost struje odvoda smo uzeli najveću izmjerenu vrijednost odnosno zadnju točku mjerjenja.

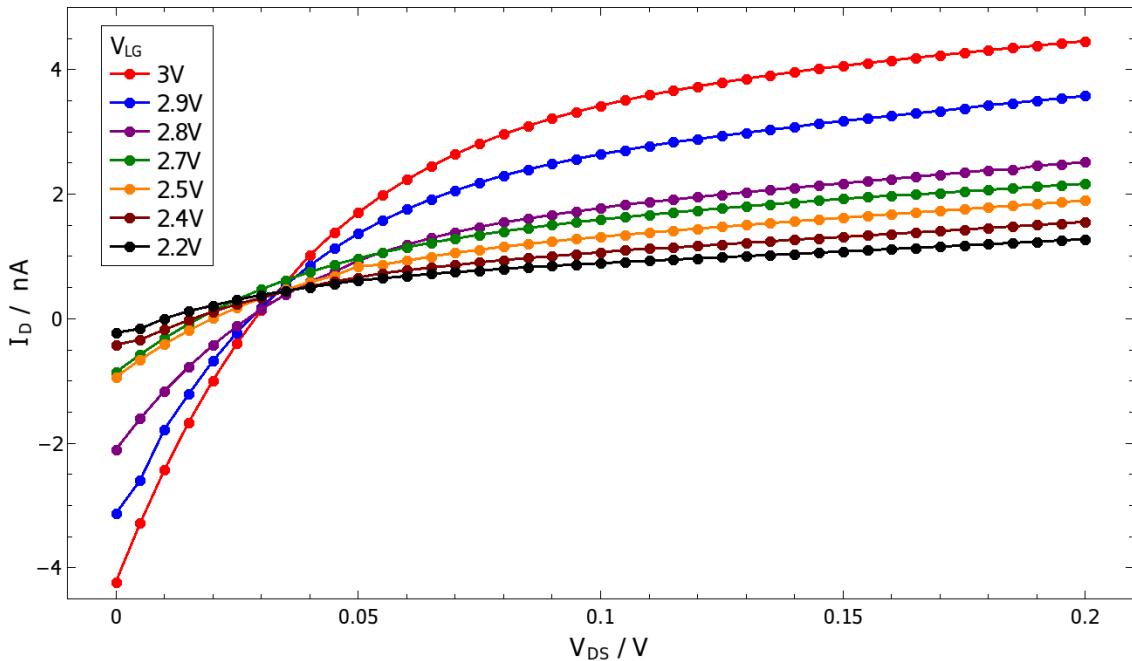


Slika 6.7: Karakteristika tranzistora za izvor na X-28 i odvod na 19-B

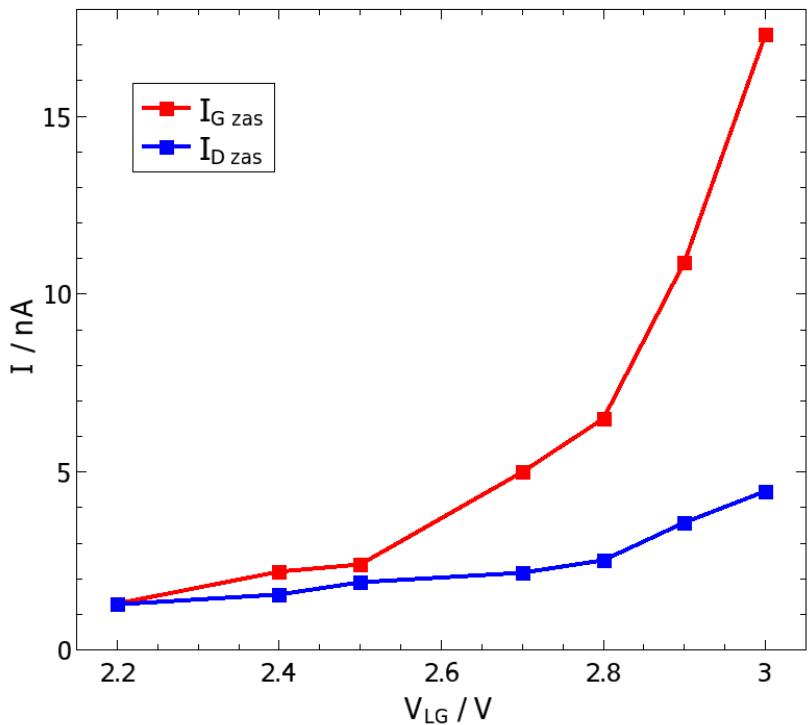


Slika 6.8: Odnos I_G i I_D za izvor na X-28 i odvod na 19-B

Sljedeća konfiguracija je za odvod na kontaktu 6G (slika 6.9). Mjerjenje su pokazala da je iznos struje manji od konfiguracija na kontaktima 5H i 21B. Početne vrijednosti struje su negativne. Slika 6.10 prikazuje odnos između struja I_G i I_D , je vrlo vidljiva razlika između struja.

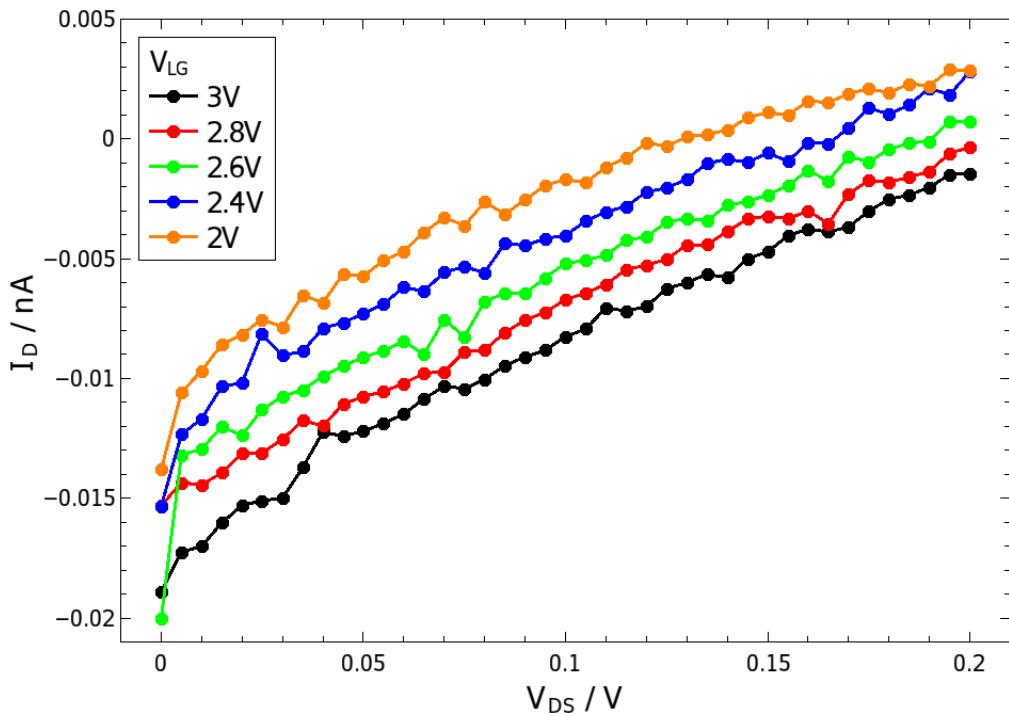


Slika 6.9: Karakteristika tranzistora za izvor na X-28 i odvod na 6G

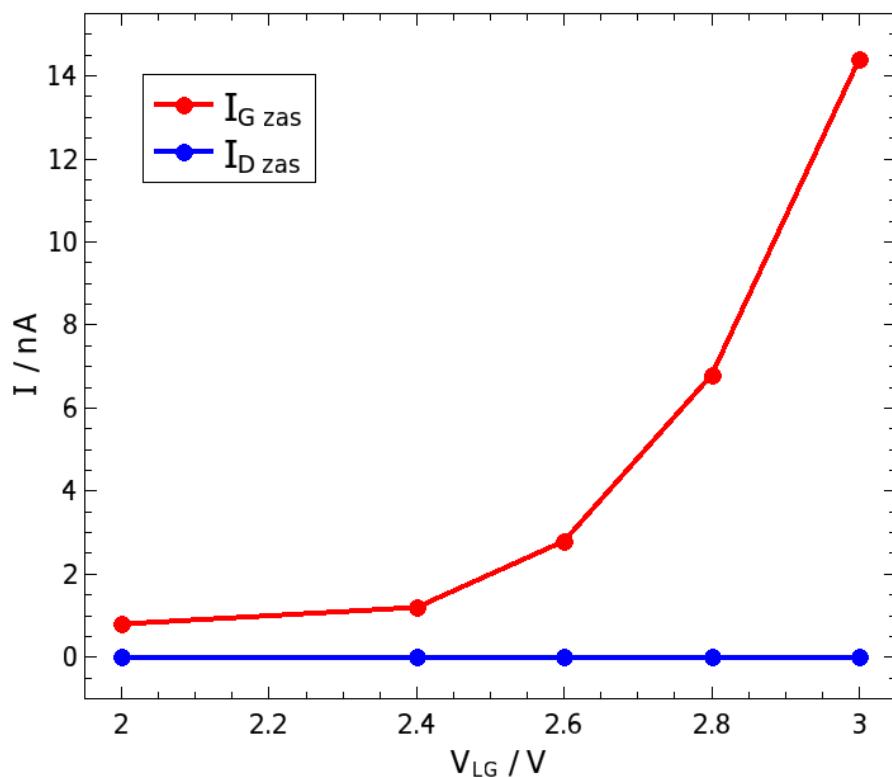


Slika 6.10: Odnos I_G i I_D za izvor na X-28 i odvod na 6G

Karakteristika tranzistora s odvodom na kontaktu 14-D (slika 6.11), vrlo slična s konfiguracijom 19-B. Odnosno sklop radi kao izolator. Također odnos između struja odvoda i vrata I_D i I_G je vrlo sličan (slika 6.12) te je su vrijednosti struja odvoda ponovo uzete najveće izmjerene vrijednosti kao što smo učinili u konfiguraciji 19-B (slika 6.7).



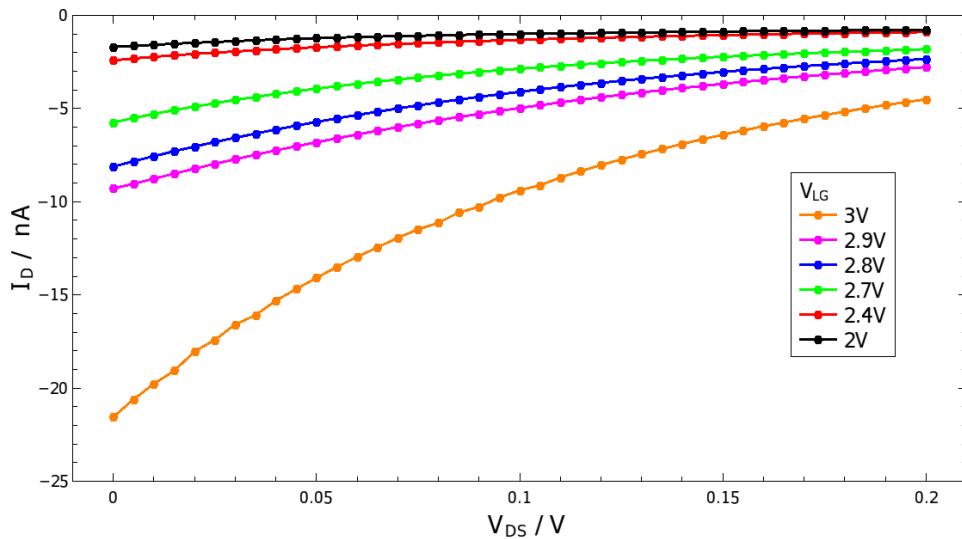
Slika 6.11: Karakteristika tranzistora za izvor na X-28 i odvod na 14-D



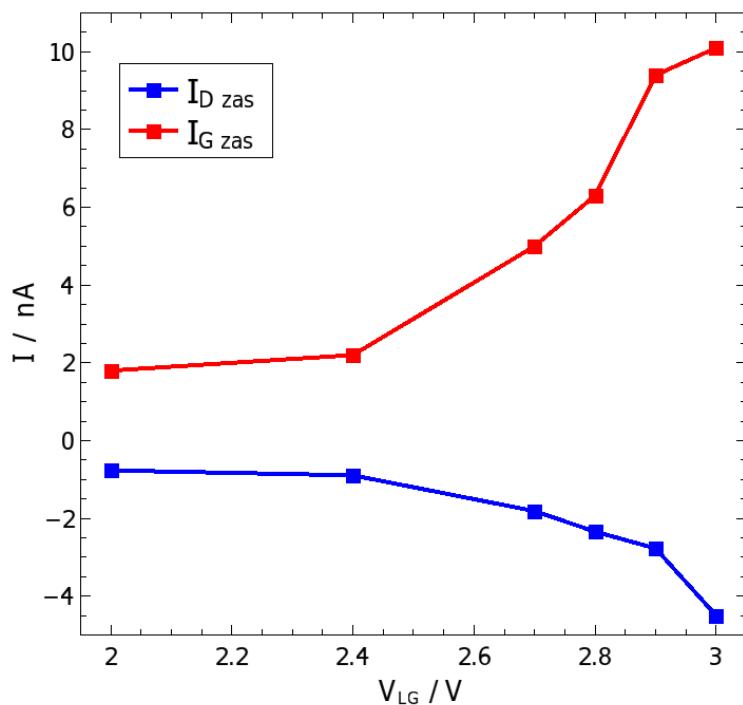
Slika 6.12: Odnos I_G i I_D za izvor na X-28 i odvod na 14-D

6.2 Izvor 14-D

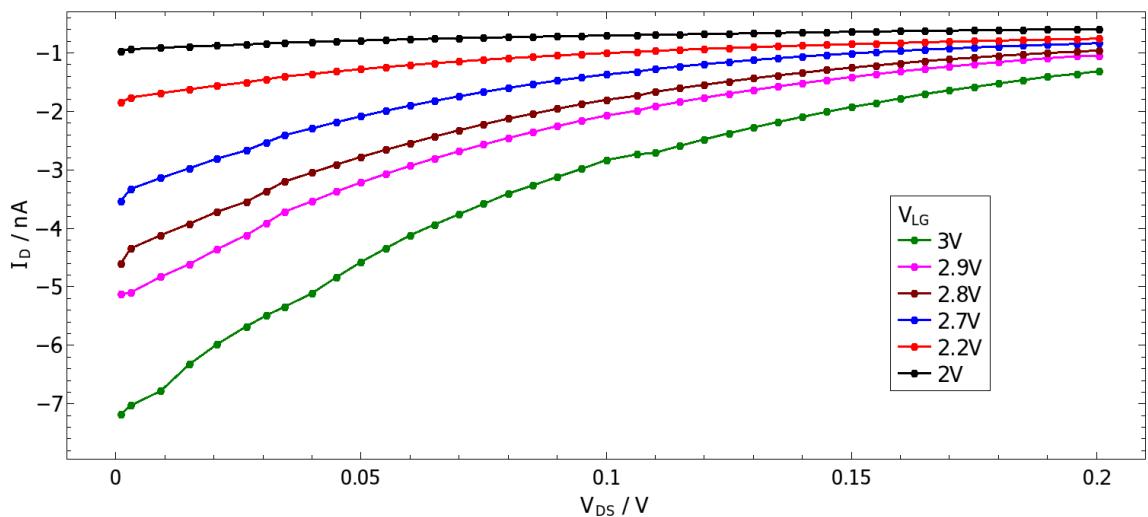
Sljedeće karakteristike su s izvorom na kontaktu 14-D. Prva konfiguracija je s odvodom na kontaktu 21B (slika 6.13). Primijetimo da su struje I_D negativne. Većeg su iznosa (više negativne) pri većem iznosu napona vrata V_{LG} . Slika 6.14 pokazuje trend rasta struje u negativnim iznosima pri većem naponu V_{LG} . Karakteristike ostalih konfiguracija su vrlo slične stoga ćemo ih sve zajedno analizirati i opisati. Njihove karakteristike i usporedbe s strujom I_G nalaze se na idućim stranicama.



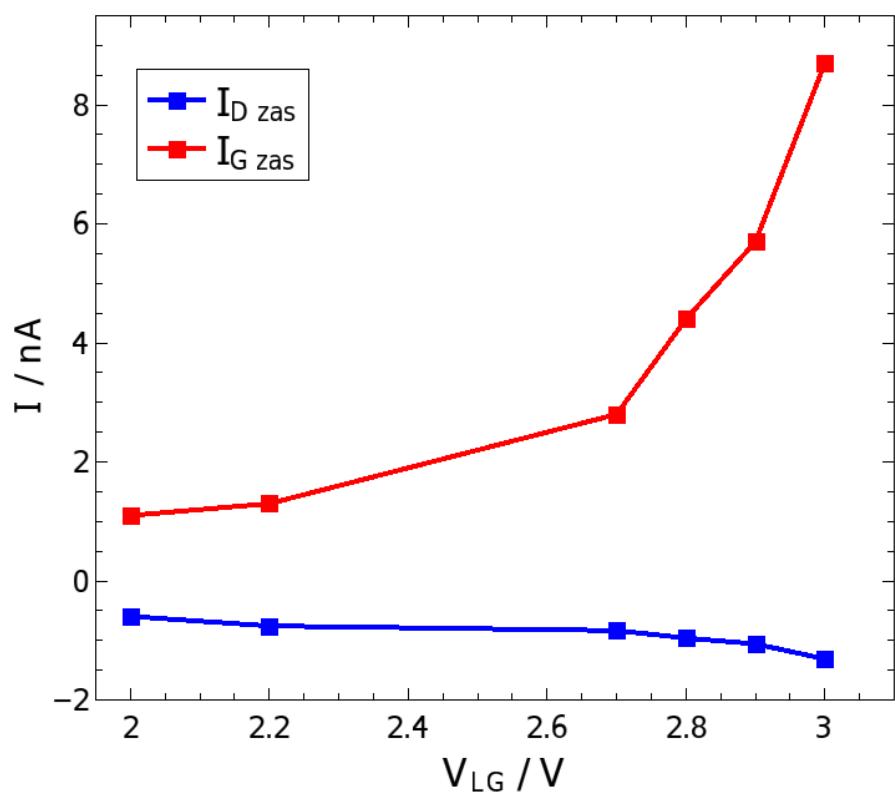
Slika 6.13: Karakteristika tranzistora za izvor na 14-D i odvod na 21-B



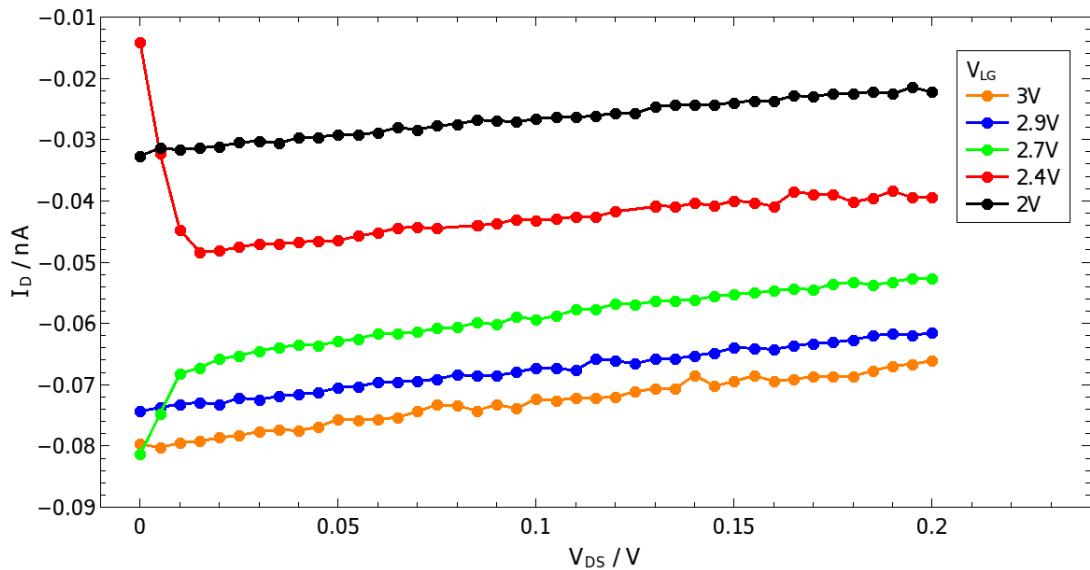
Slika 6.14: Odnos I_G i I_D za izvor na 14-D i odvod na 21-B



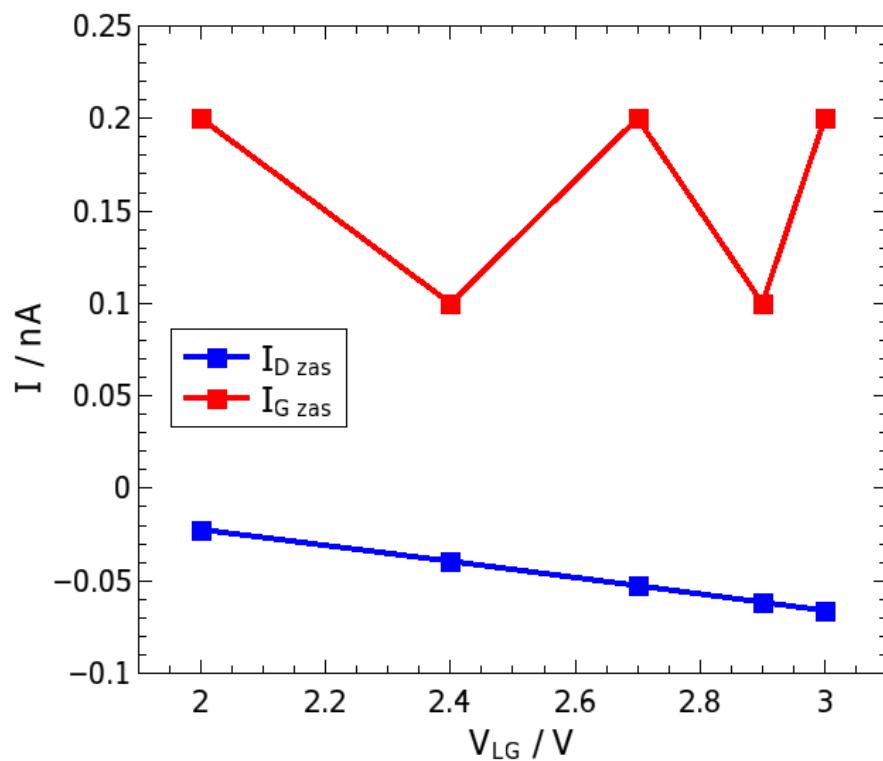
Slika 6.15: Karakteristika tranzistora za izvor na 14-D i odvod na 5H



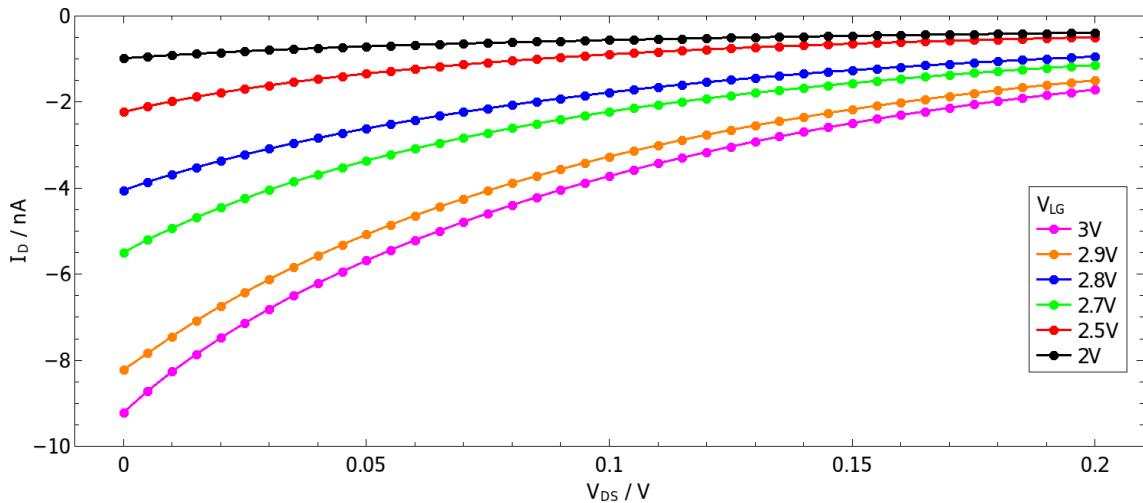
Slika 6.16: Odnos I_G i I_D za izvor na 14-D i odvod na 5H



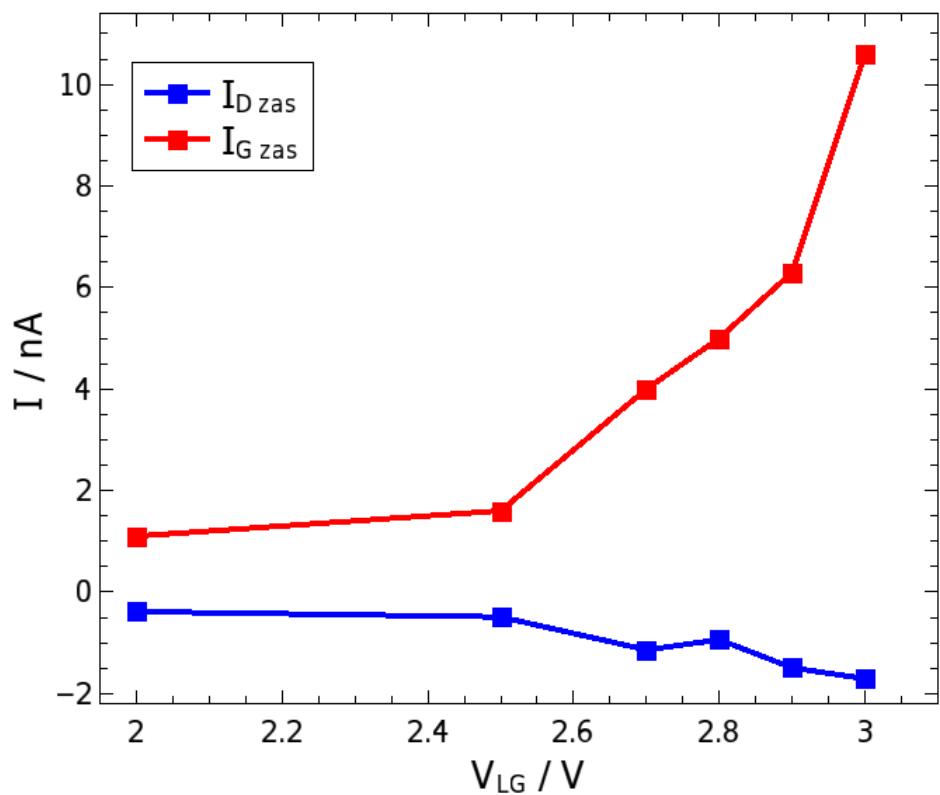
Slika 6.17: Karakteristika tranzistora za izvor na 14-D i odvod na 19-B



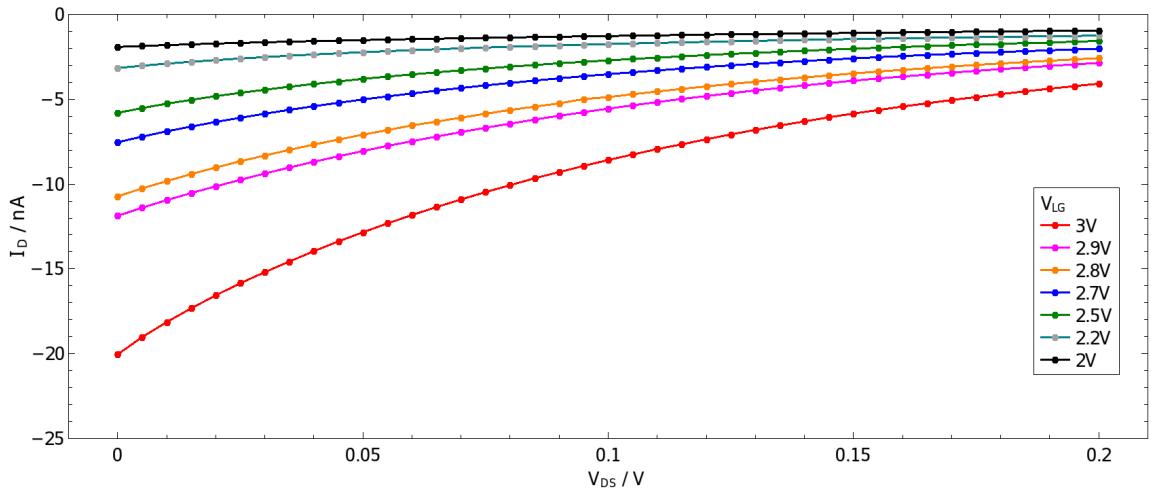
Slika 6.18: Odnos I_G i I_D za izvor na 14-D i odvod na 19-B



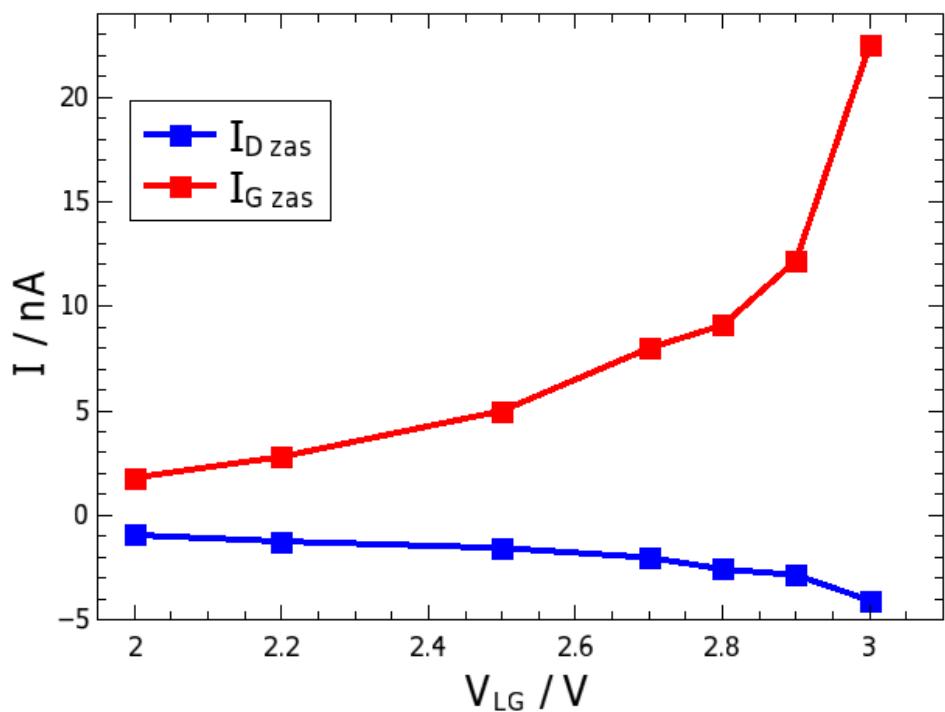
Slika 6.19: Karakteristika tranzistora za izvor na 14-D i odvod na 6G



Slika 6.20: Odnos I_G i I_D za izvor na 14-D i odvod na 6G



Slika 6.21: Karakteristika tranzistora za izvor na 14-D i odvod na X-28



Slika 6.22: Odnos I_G i I_D za izvor na 14-D i odvod na X-28

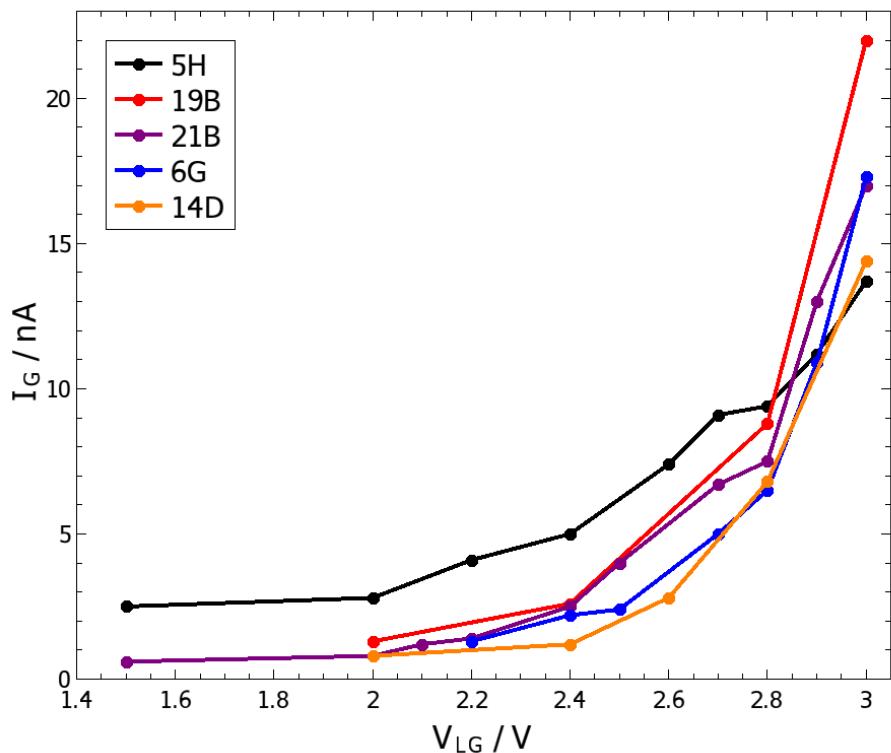
6.3 Analiza rezultata mjerena

Mjerni rezultati nam govore o zanimljivim svojstvima koje ima uzorak/tranzistor. Mjerena prilikom kojih je izvor na kontaktu X-28 (potpoglavlje 6.1) imaju karakteristiku uzorka koja nalikuje testnom tranzistoru (slika 5.10). Promotrimo li ponovo sliku 6.3 možemo primijetiti da postoji područje gdje struja odvoda raste i postaje konstanta (struja zasićenja). Također veći napon vrata V_{LG} rezultira povećanju struje zasićenja. Razlike naravno postoje. Jedna od njih je područje struje odvoda koji je u nA (za razliku od K246 koja je mA). Osim toga početne struje su iznosom negativne s većim naponom V_{DS} rastu i prelaze u pozitivno područje.

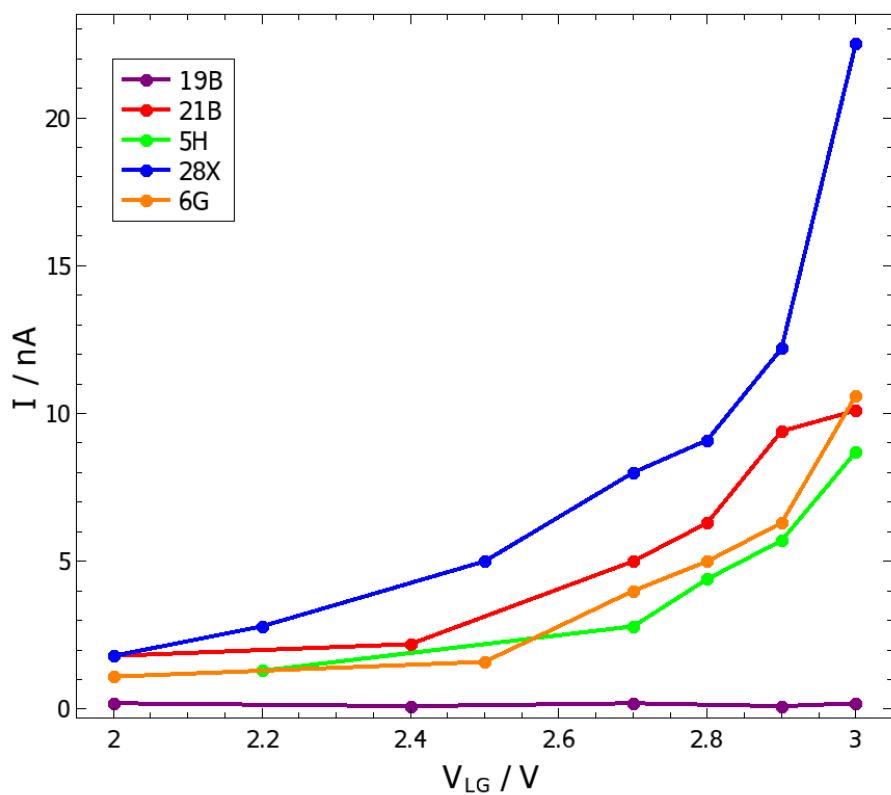
Konfiguracije pri kojima izvor na je kontaktu 14-D (potpoglavlje 6.2) imaju rezultate mjerena koja odstupaju od spomenutih. Uzmimo za primjer mjerene prikazano na slici 6.13. Struja odvoda je također u području nA, ali njezin iznos je uvijek negativna. Možemo primijetiti da struja odvoda ima veliku negativnu vrijednost te ona s povećanjem napona V_{DS} se smanjuje (postaje manje negativna). Pri povećanju napona na vratima V_{LG} raste iznos početne struje odvoda. Kao kod tranzistora postoji određeni prag za napon V_{LG} pri kojemu uzorak ima karakteristike rada tranzistora. Obje konfiguracije imaju isti prag koji iznosi 2.5V. Ispod njega uzorak ne pokazuje karakteristiku rada tranzistora (konfiguracije na slikama 6.7, 6.11 i 6.17). Slike 6.24 i 6.23 nam prikazuju iznose svih struja I_G za pojedini izvor. Možemo primijetiti da su iznosi struja I_G slični i da imaju sličan oblik rasta. Primijetimo da iznosi struja I_G su veći na izvoru 14-D nego na izvoru X-28. Možemo protumačiti to da struja odvoda teče u istom smjeru kao struja vrata te se ukupna struja curenja (eng. "leakage current") povećava. Struju curenja je pojava koju želimo što više minimizirati jer ona utječe da postoji strujno pojačanje. Odnosno uzorak nema vrlo važnu osobinu poznatu tranzistorima.

Postupak mjerena je zahtijevao strpljivost. Mjerni postav je vrlo osjetljiv na vibracije. Moguće objašnjenje je zbog elektroda koje su se mogle pomicati te područje mjerena. Struje odvoda su u području nA te zbog malih promjena vanjskih uvjeta moguće je odstupanje struja. Potrebno je napomenuti da se iz rezultata mjerena može primijetiti ovisnost pojedine karakteristike o udaljenosti kontakta odvoda i izvora. Prilikom svake promjene napona vrata V_{LG} primijećen je nagli skok struje vrata I_G koji bi nakon određenog vremena dosegao stabilne vrijednosti. Objašnjenje pojave je u tromosti iona u ionskoj tekućini prilikom formiranja EDL-a. Usporedimo li rezultate mjerena 6.3, 6.5 i 6.9 možemo primijetiti da što manja udaljenost između odvoda i izvora to je njena karakteristika "bolja", tj. veći I_D . Najkraću udaljenost ima konfiguracija 5H, 21-B pa 6G. Iznosi struja zasićenja (struja odvoda I_D) po veličini isto poredani. Razlog ovisnosti karakteristike o udaljenosti kontakata je povezan s polarizacijom iona ionske tekućine koju uzrokuje dvostruki sloj na kojemu se zasniva rad tranzistora.

Oblik kapljice promatran je nakon svakog mjerena konfiguracije i njezin oblik se nije mijenjao. Napomenimo da se volumen nije mijenjao (u obliku isparavanja tekućine) kroz cjelokupan postupak mjerena, a period trajanja mjerena je nekoliko tjedana. Možemo zaključiti da ionska tekućina korištena (4.7) prilikom izrade tranzistora pokazala je stabilnost rada na sobnoj temperaturi.



Slika 6.23: Odnosi I_G za sve kombinacije odvoda pri izvoru na X-28



Slika 6.24: Odnosi I_G za sve kombinacije odvoda pri izvoru na 14-D

7 Zaključak

Elektrostatsko dopiranje se pokazalo kao moćan alat u manipulaciji svojstva materijala. Moguće je pomoći njega ostvariti tranziciju izolatora u vodič, supravodič i mnoge druge tranzicije opisane u [8]. Njenom primjenom smo omogućili izolatoru (STiO_3) da pri određenim uvjetima postane vodljiv. Postupak izrade je zahtjeva preciznost i strpljivost, ali i korištenje modernih uređaja i opreme. Rad je detaljno opisao svaki korak izrade u želji da se nastavi s istraživanjem. Pomoći programskog paketa uspjeli smo umanjiti pogreške u mjerenu i uvelike smanjili šumove. Ubrzali smo sami postupak mjerena i smanjili mogućnost ljudske pogreške.

Programski paket *QTiplot* nam je omogućio grafičku reprezentaciju mjerena (karakteristike) iz podataka koje smo imali na raspolaganju. Mjerena su pokazala elektrostatsko dopiranje u djelovanju. Karakteristike su nam pokazale sličnosti i različitosti tranzistora kojeg smo izradili u odnosu na testni tranzistor. Struja vrata je u većini slučajeva iznosom bila veća od struje odvoda te nam sugerira pojavu struje curenja koja nije poželjna pojava u kontinuiranom radu tranzistora. Također područje struje odvoda je u području nA što je manje od područja struje testnog tranzistora. Nedostatke je moguće ispraviti te poboljšati njegov rad promjenom postupka izrade. Litografskim postupkom kojim bi se smanjile udaljenosti među kontaktima [8], korištenjem druge ionske tekućine i slično. Viskoznost ionske tekućine uvelike može utjecati na rad tranzistora, stoga današnja istraživanja su fokusirana na ionske tekućine malih viskoznosti. Proučavaju se organski materijali, različiti polimeri, kompoziti, grafen za postizanje željenog dopiranja materijala. Elektrostatskim dopiranjem otvorena su mnoga vrata u proučavanju svojstva materijala. Fronta današnjih istraživanja je u potrazi za alternativnim i ekološkim rješenjima u području obnovljive energije i transporta. Naredna istraživanja uzorka treba nastaviti na niskim temperaturama gdje bi se mogla istražiti supravodljivost.

Literatura

- [1] Ministarstvo znanosti i obrazovanja, Odluka o donošenju kurikuluma za nastavni predmet Fizike za osnovne škole i gimnazije u Republici Hrvatskoj, (2019), https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_01_10_210.html, 10.9.2019.
- [2] Vjera Lopac, Petar Kulišić Fizika 4. Zagreb: Školska knjiga, 2007.
- [3] H.D. Yound, R.A. Freedman University Physics 13th Edition. Pearsons, 2012
- [4] Ispravljačka dioda, Nacionalni centar za učenje na daljinu Nikola Tesla, <http://tesla.carnet.hr/mod/scorm/loadSC0.php?id=594&scoid=727&mode=normal>, 17.9.2019
- [5] Why Silicon is a semiconductor, <https://www.youtube.com/watch?v=WBdT6Qw-wg>
- [6] What is a semiconductor?, <https://www.youtube.com/watch?v=gUmDVe6C-BU>.
- [7] Silicon, semiconductors and solar cells Crash Course Engineering, <https://www.youtube.com/watch?v=ivWXu0d5SrI>
- [8] Fujimoto, T.; Awaga, K. Electric-double-layer field-effect transistors with ionic liquids. // Phys. Chem. Chem. Phys. **15**, (2013), str. 8983-9006.
- [9] Sato, T.; Marukane, S.; Morinaga, T. Ionic Liquids for the Electric Double Layer Capacitor Applications. // Tsuruoka National College of Technology, (2011), str. 109-134.
- [10] G.Gupta; B.Rajasekharan; R.J. E. Huetting Electrostatic Doping in Semiconductor Devices. // IEEE Transactions on Electron Devices, (2017) str. 1-12
- [11] Ueno, K.; Nakamura, S.; Shimotani, H.; Ohtomo, A.; Kimura, N.; Nojima, T.; Aoki, H.; Iwasa, Y.; Kawasaki, M. Electric-field-induced superconductivity in an insulator. // Nature. Vol. 7, (2008), str. 855-858.
- [12] Nakamura, T.; Hattori, A.N.; Nguyen, T.V.A ; Fujiwara, K.; Tanaka, H. Discrimination between gate-induced electrostatic and electrochemical characteristics in insulator-to-metal transition of manganite thin films. // Applied Physics Express **8**, (2015), str. 073201.
- [13] X., Leng; J., Garcia-Barriocanal; B., Yang; Y., Lee; J. Kinney; A., M., Goldman Indications of an Electronic Phase Transition in Two-Dimensional Superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Thin Films Induced by Electrostatic Doping. // Physical Review Letters **108**, (2012), 067004
- [14] HB02/04/05 Wire Bonder: Operation Manual Version 2.7, www.tpt.de, 20.5.2019.
- [15] Ueno, K.; Nakamura, S.; Shimotani, H.; Yuan, H.T.; Kimura, N.; Nojima, T.; Aoki, H.; Iwasa, Y. ; Kawasaki, M. Discovery of superconductivity in KTaO_3 by electrostatic carrier doping. // Nature Nanotechnology Letters. Vol. **6**, (2011), str. 408-412.

- [16] Toshiba FET Silicon N Channel Junction Type, Toshiba,
http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/166/388279_DS.pdf,
4.8.2019.
- [17] Model 6485 Picoammeter Model 6487 Picoammeter/Voltage Source User's Manual, Keithley Instruments, (2011)
- [18] Series 2600A System SourceMeter Instruments User's Manual, Keithley Instruments, (2008)
- [19] Ueno, K.; Shimotani, H.; Iwasa, Y.; Kawasaki, M. Electrostatic charge accumulation versus electrochemical doping in SrTiO_3 electric double layer transistors. // Appl. Phys. Lett. **96**, (2010), str. 252107.
- [20] J., Knoch; M.,R., Muller Electrostatic Doping Controlling the Properties of Carbon-Based FETs With Gates. // IEEE Transactions on Nanotechnology, VOL. **13**, (2014), str. 1044-1052
- [21] Eyvazov, A.B.; Inoue, I.H.; Stolar, P.; Rozenberg, M.J.; Panagopoulos : Enhanced and continuous electrostatic carrier doping on the SrTiO_3 surface. // Sci. Rep. **3**, (2013), str. 1721-1726.
- [22] Ye, J.T.; Zhang, Y.J.; Akashi, R.; Bahramy, M.S.; Arita, R.; Iwasa, Y. Superconducting Dome in a Gate-Tuned Band Insulator. // Science, Vol. **338**, (2012), str. 1193-1196.
- [23] Tonči Andreis, Miro Plavčić, Nikica Simić Fizika 4. Zagreb: Profil, 2013.