

UNIVERZA V NOVI GORICI
POSLOVNO-TEHNIŠKA FAKULTETA

DIPLOMSKO DELO

**MERITVE VPLIVA ZAPORNE NAPETOSTI NA NAPETOST POPOLNEGA
OSIROMAŠENJA V SILICIJEVIH DETEKTORJIH**

Darko Šuligoj

Mentor: dr. Gregor Kramberger

Somentor: doc. dr. Marko Zavrtanik

Nova Gorica, 2007

ZAHVALA

Pot skozi študijska leta je polna najrazličnejših dogodkov, ki človeka v vseh pogledih zaznamujejo in izpoplnijo. Vsi ti dogodki, dobri ali slabi, nas pripeljejo do določenih spoznanj. Na tej poti pa vedno znova potrebujemo nekoga, ki nam pomaga, nas vodi ali pa samo svetuje. Tudi jaz sem skozi vsa študijska leta potreboval, želel, včasih celo zahteval pomoč od mnogih ljudi. Teh nekaj besed je zato namenjenih v zahvalo vsem, ki so mi kakorkoli pomagali. Zavaljujem se vsem prijateljem, ki so mi dajali nasvete z najrazličnejših področij. Zahvaljujem se Univerzi v Novi Gorici, Poslovno-tehniški fakulteti in vsem profesorjem, ki so mi v vseh teh letih podali vse njihovo znanje ter izkušnje. Zahvaliti se moram vsem osebam s katerimi sem sodeloval na odseku F9 Instituta Jožef Stefan v Ljubljani, kjer je nastal velik del moje naloge. Še posebej pa gredo vse moje zahvale in spoštovanje mentorju dr. Gregorju Krambergerju ter somentorju doc. dr. Marku Zavrtaniku, ki sta mi pri nastajanju te diplomske naloge ogromno pomagala in z veliko mero potrpljenja poslušala vsa moja vprašanja ter mi na obširen in zelo strokoven način podajala vse odgovore. Na koncu pa gre še posebna zahvala moji družini, ki me je skozi celoten študij spodbujala, bodrila ter včasih tudi priganjala, predvsem pa podpirala tako finančno, predvsem pa moralno.

IZVLEČEK

V diplomski nalogi je najprej opisan detektor ATLAS, kjer bodo vgrajeni silicijevi detektorji. Nato so opisani silicijevi detektorji, njihove lastnosti ter način delovanja pred in po obsevanju. V nadaljevanju je podan oris merilnega sistema uporabljenega pri našem poskusu ter način določanja napetosti popolnega osiromašenja silicijevih detektorjev. Glavni del naloge predstavlja opis v poskusu uporabljenih detektorjev in rezultati, ki smo jih s poskusom dobili. Na koncu so v nekaj točkah predstavljeni še zaključki poskusa.

ABSTRACT

The thesis starts with description of ATLAS spectrometer, which exploits silicon detectors for tracking of the charged particles. A description of the silicon detectors, their characteristics and their properties before and after irradiation follow. The measurement system for determination of capacitance-voltage characteristics is described together with the method used to determine the full depletion voltage of the silicon detector. In the main part of this thesis the detectors used in our experiment and obtained results are presented. The conclusions are given in the end.

KLJUČNE BESEDE

Silicijevi detektorji, napetost popolnega osiromašenja, sevalne poškodbe

KEY WORDS

Silicon detectors, full depletion voltage, radiation damage

KAZALO

1	UVOD	1
2	ZGRADBA IN LASTNOSTI SILICIJEVIH DETEKTORJEV	5
2.1	Osnove delovanja detektorjev	5
2.2	Osnovne značilnosti detektorjev	6
2.3	Značilnosti obsevanih detektorjev	10
3	MERILNI SISTEM IN UPORABLJENI VZORCI.....	13
3.1	Merilni sistem.....	13
3.1.1	Opis merilnega sistema	13
3.1.2	Kalibracija merilne naprave.....	15
3.1.3	Način določanja napetosti popolnega osiromašenja	16
3.2	Opis uporabljenih vzorcev	18
4	REZULTATI MERITEV	20
4.1	Primerjava izmerjene kapacitete in toka med poskusom.....	20
4.2	Rezultati meritev vpliva zaporne napetosti na napetost popolnega osiromašenja uporabljenih vzorcev.....	21
4.3	Vpliv zapornega toka pri meritvah.....	27
5	ZAKLJUČEK	28
6	LITERATURA	29

KAZALO SLIK

Slika 1.1: Detektor ATLAS	2
Slika 1.2: Notranji detektor.....	3
Slika 2.1: Prečni prerez silicijevega detektorja.....	5
Slika 2.2: Električno polje (levo) in potencial čez stik p – n v približku popolnoma osiromašene plasti. Na koordinati x je izražena debelina osiromašene plasti (w).....	7
Slika 2.3: C - V karakteristika za idealni primer.....	9
Slika 2.4: Prikaz časovnega razvoja efektivne koncentracije nečistoč	10
Slika 3.1: Shema merilnega sistema.....	14
Slika 3.2: Vzorec prilepljen v ohišju.....	14
Slika 3.3: Odvisnost $1/C^2$ od zaporne napetosti za različne konfiguracije meritev. Meritve preko preklopne matrice - PM (zeleni in modri trikotniki) se razlikujejo od meritev v merilni postaji - MP (črni krogi in rdeči kvadratki) in meritev v ohišju brez preklopne matrice (vijolični krogi).	16
Slika 3.4: Določanje napetosti popolnega osiromašenja iz odvisnosti $1/C^2$ od zaporne napetosti. Posamezne krivulje predstavljajo različne frekvence, ki si z vrha proti dnu sledijo s 100, 30, 10, 3 in 1 kHz. Z rdečimi kvadratki je označena $\nu=10$ kHz, pri kateri smo opravili analizo.....	17
Slika 3.5: Odvisnost U_{po} od časa po obsevanju ($T=20^{\circ}C$) za dve diodi. Meritve v diplomskem delu se nanašajo na pojav dviga U_{po} po vklopu napetosti na S3A pri 2200h in S3B pri 3400h.....	18
Slika 4.1: Vpliv napetosti na tok.....	20
Slika 4.2: Prikaz rezultata poskusa (zgoraj) in razlaga posameznih delov grafa.....	21
Slika 4.3: Podroben prikaz padanja napetosti popolnega osiromašenja po izklopu dodatne zaporne napetosti.....	23

Slika 4.4: Rezultati poskusa vseh uporabljenih vzorcev	25
Slika 4.5: Faktor spremembe napetosti popolnega osiromašenja s fluenco obsevanja	26
Slika 4.6: Spremembe zapornega toka	27

KAZALO TABEL

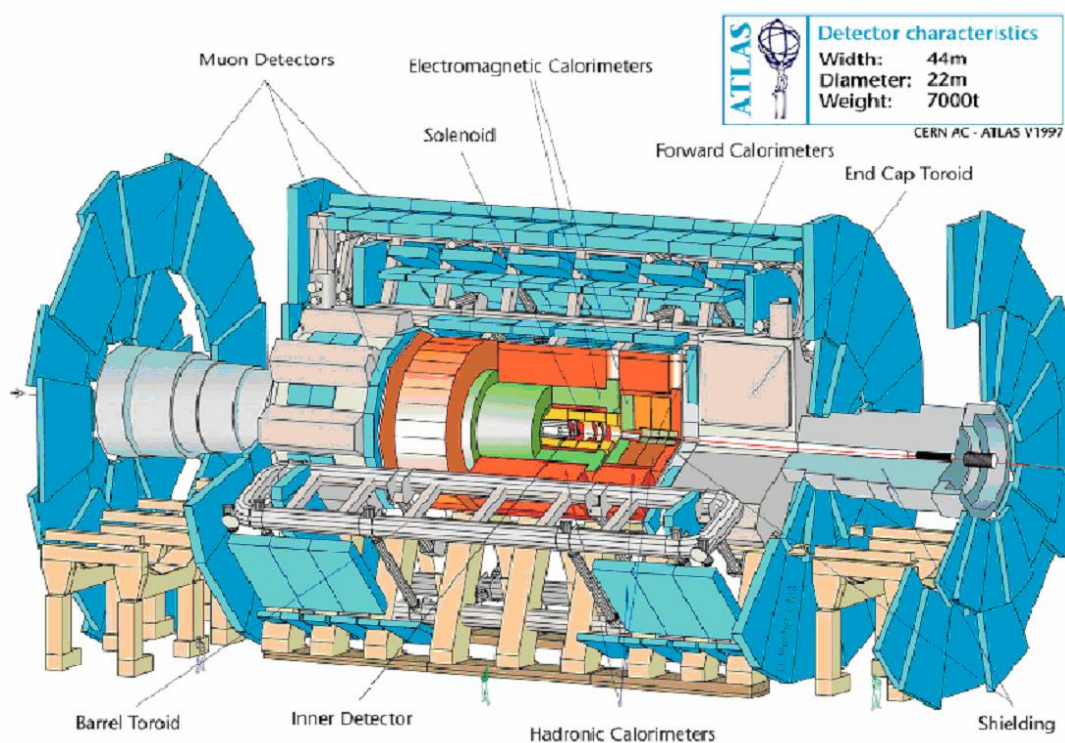
Tabela 1: Opis in lastnosti uporabljenih vzorcev	19
Tabela 2: Rezultati dobljeni pri določanju g_b , $\tau_{1/2}$ ter $\tau'_{1/2}$	26

1 UVOD

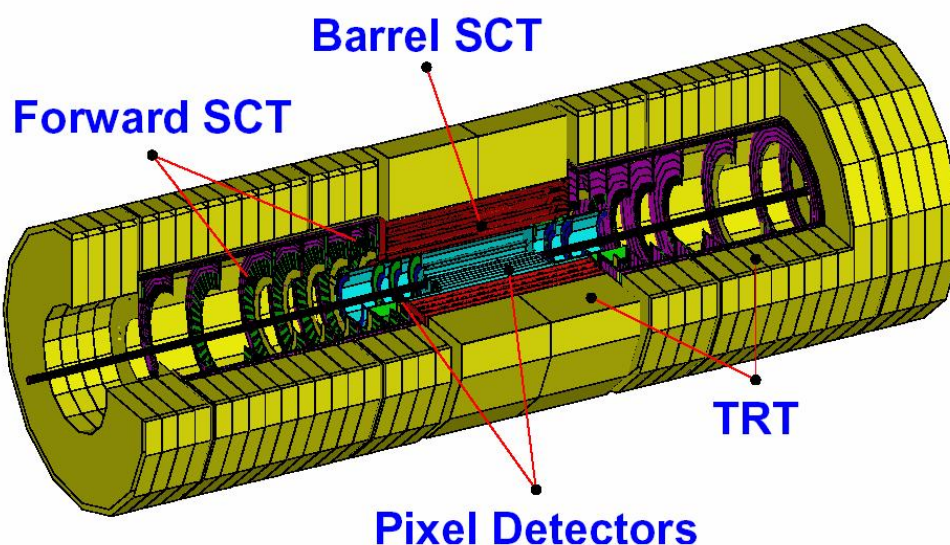
Moja odločitev, da se posvetim študiju gospodarskega inženirstva je plod spoznanja, da je ta zelo širok in za mojo prihodnost koristen. To širino dokazuje dejstvo, da se v triletnem obdobju, kolikor študij traja, študentje srečajo in pridobivajo znanja tako iz področja naravoslovnih kot družboslovnih ved. Kljub temu, da je ta študij tako širok in daje možnost spoznavanja večine področij, ki jih danes v gospodarstvu najdemo, ponavadi pri zaključku študija in nastanku diplomske naloge prevlada želja po spoznavanju in raziskovanju nečesa novega. Eno od možnosti najdemo v znanstveno raziskovalnem delu, ki je v mojem primeru potekala v okviru praktičnega usposabljanja na Institutu Jožef Stefan. Seveda pa tovrstnega dela ni mogoče početi brez neke osnovne podlage, ki jo študent pridobi prav na predavanjih v okviru študija gospodarskega inženirstva. Tukaj je potrebno predvsem omeniti predmete kot je fizika, elektrotehnika in računalništvo, prav pa vedno pride tudi nekaj znanja iz kemije. Tako študent lahko spozna način raziskovanja, delo z novimi materiali, uporabo novih materialov v gospodarstvu kot tudi v vsakdanjem življenju ter tesno povezavo med gospodarstvom, ki je v večnem boju s konkurenco, in znanstveno raziskovalnim področjem, ki mu z novimi spoznanji daje možnost to konkurenco premagovati. Seveda pa so uporabna tudi ostala znanja, ki jih študent pridobi v okviru študija in so vsakodnevno uporabna pri sodelovanju tako v ozkem kot tudi v zelo širokem timu sodelavcev.

Eno od spoznanj, ki sem jih pridobil med študijem in raziskovanjem na Institutu Jožef Stefan je, da je težnja po znanju človeštva iz dneva v dan vedno večja, zato postaja potrjevanje idej in teorij, ki vsak dan nastajajo v fiziki, vedno težje. Eno izmed orodij fizikov za potrditev teorij je trkalnik z imenom LHC (Large Hadron Collider). Ta trkalnik bo konec leta 2007 začel delovati v Evropskem centru za fiziko osnovnih delcev CERN pri Ženevi. Trkalnik protonov z obsegom 27 km, naj bi pomagal odgovoriti na vprašanja povezana z obstojem Higgsovega bozona in razjasniti veljavnost mnogih drugih teorij v fiziki osnovnih delcev. Higgsov bozon je od 25 neodvisnih parametrov, kolikor jih potrebujemo za opis osnovnih interakcij v naravi, še edini popolnoma neznan. Je ključen za veljavnost Standardnega modela, kakor pravimo teoriji, s katero opisujemo osnovne delce in interakcije med njimi. Poleg Higgsovega bozona naj bi nam LHC pomagal odgovoriti še na vprašanja

povezana z drugimi teorijami in potrdil, ali pa tudi ne, njihovo veljavnost. Popeljal naj bi nas v čas samo 10^{-12} s po velikem puku, ko je vesolje imelo temperaturo 10^{16} K (Kolar, 2000). LHC bo protone pospeševal do energije 7 TeV, kar pomeni, da bodo ob trku žarkov v težiščnem sistemu na voljo kar 14 TeV energije. Med sabo bodo protoni trčili na štirih interakcijskih točkah, na katerih bodo postavljeni detektorji. Na enem od njih, spektrometru ATLAS (A large Toroidal LHC ApparatuS), sodeluje tudi Odsek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev Instituta Jožef Stefan v Ljubljani. Spektrometer ATLAS meri 44 m v dolžino, 22 m v premeru in ima maso 7000 t (Slika 1.1). Njegovo zgradbo lahko razdelimo na več manjših poddetektorjev, od katerih ima vsak posebno vlogo pri zaznavanju delcev. Najbližje interakcijski točki bo notranji detektor (Inner Detector), ki je prikazan na sliki 1.2. Njegova naloga bo natančno določiti sledi nabitih delcev. Iz teh bo možno določiti mesta razpadov kratkoživih delcev. Notranji detektor bo imel polmer 115 cm, dolg pa bo 6.78 m (Kolar, 2000). Tudi notranji detektor bo sestavljen iz treh manjših delov. Zunanji podsistem, ki se imenuje TRT (Transition Radiation Tracker), bo sestavljen iz plinskih cevk



Slika 1.1: Detektor ATLAS



Slika 1.2: Notranji detektor

premera 4 mm, postavljenih na sredini notranjega detektorja vzporedno z žarkom na obeh koncih detektorja. Naslednji podsistem, ki se nahaja v notranjosti TRT-ja, je SCT (SemiConductor Tracker). Sestavljen bo iz silicijevih mikropasovnih detektorjev, ki bodo postavljeni v štiri lupine na sredini detektorja. Na vsaki strani bo imel devet diskov, ki bodo ravno tako sestavljeni iz silicijevih mikropasovnih detektorjev. Najbližje žarku protonov bo postavljen podsistem imenovan Točkovni detektorji (Pixel detectors). Posamezne silicijeve ploščice bodo postavljene v tri valjaste lupine v notranjosti detektorja. Valji bodo zaprti s štirimi diski, ki bodo zaznavali delce v smereh, ki jih lupine ne bodo pokrile (Kolar, 2000).

Silicijevi detektorji so v osnovi polprevodniške diode, ki imajo eno ali obe strani razdeljene na pasove oziroma blazinice, s katerimi lahko z mikronsko natančnostjo določamo koordinate preleta delca skozi detektor. Če takšno diodo priključimo na napetost v zaporni smeri, se v kristalu ustvari električno polje, ki loči vrzeli in elektrone nastale ob preletu nabitega delca skozi detektor (Kramberger, 1998). Če uspemo zaznati kje se je zbral naboj, lahko določimo mesto preleta nabitega delca skozi detektor. Ti delci pa v detektorjih povzročajo poškodbe kristalne rešetke. V detektorju SCT bodo le te enakovredne tistim, ki jih povzroči prelet $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ nevtronov z energijo 1 MeV. Tolikšne sevalne poškodbe pa niso zanemarljive, zaradi njih se namreč lastnosti detektorja zelo poslabšajo. Zmanjša se učinkovitost zbiranja

naboja, poveča se mrtvi tok in napetost U_{po} , ki je potrebna za popolno osiromašenje detektorja (Kramberger, 1998). Ker za učinkovito delovanje detektorjev potrebujemo napetost, ki je višja od U_{po} , lahko zaradi potrebnih visokih napetosti pride do preboja, poleg tega pa se zaradi velikih zapornih tokov detektor greje. Velik zaporni tok in gretje rešimo s hlajenjem detektorjev, porast U_{po} pa s primesmi dodanimi silicijevemu kristalu.

Zaporna napetost $U_{delovna}$, na katero bodo detektorji priključeni v detektorju ATLAS je večja od U_{po} . Izkazalo se je, da z delovno napetostjo priključeno na detektor s časom naraste tudi U_{po} , kar zahteva ustrezen dvig delovne napetosti, če želimo ohraniti enako učinkovitost delovanja detektorjev (Kolar, 2000). Prav to pa je tema pričujočega dela.

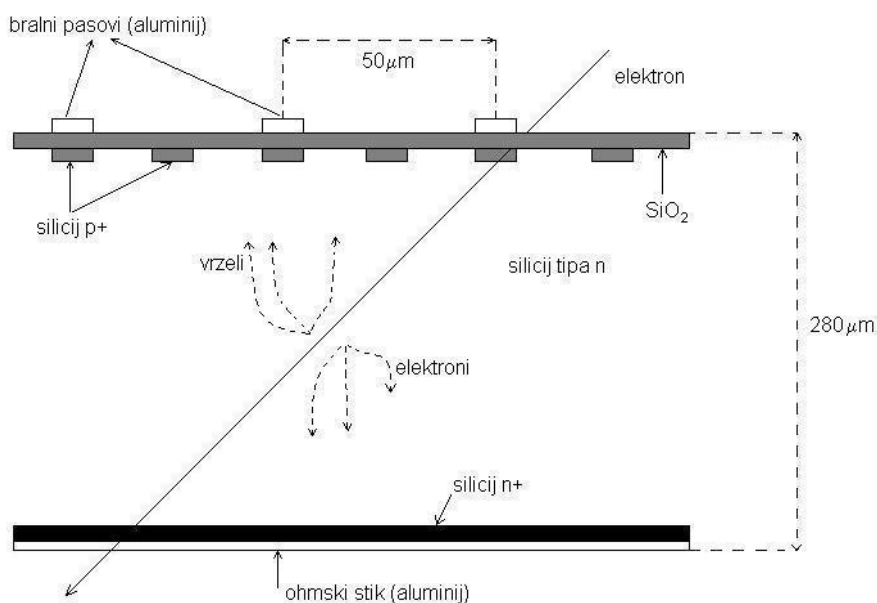
Na merilni sistem za določanje statičnih lastnosti silicijevih detektorjev, ki je postavljen na Odseku za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev Instituta Jožef Stefan v Ljubljani, smo priključili vzorce različnih silicijevih detektorjev in merili odvisnost zapornega toka in kapacitete od zaporne napetosti. Iz slednje smo lahko določili napetosti popolnega osiromašenja U_{po} . V nadaljevanju eksperimenta smo detektorje priključene na merilni sistem povezali s stalno zaporno napetostjo in tako preučevali, kakšen vpliv ima ta napetost na napetost popolnega osiromašenja U_{po} , in ali se lastnosti detektorjev pod stalno zaporno napetostjo izboljšajo ali poslabšajo. Ta vpliv imenujemo tudi »Bias-effect«.

V prvem delu diplomske naloge je opisana zgradba uporabljenih silicijevih detektorjev in ključne lastnosti neobsevanih ter obsevanih detektorjev. V nadaljevanju naloge je podana shema merilnega sistema, ki smo ga uporabljali za meritve pri našem eksperimentu. Zadnji del je namenjen predstavitvi rezultatov eksperimenta in njihovi interpretaciji. Na koncu je podan povzetek naloge.

2 ZGRADBA IN LASTNOSTI SILICIJEVIH DETEKTORJEV

2.1 Osnove delovanja detektorjev

Osnovna ideja delovanja silicijevih polprevodniških detektorjev je podobna kot pri ionizacijskih celicah, le da v silicijevih detektorjih vlogo plina prevzame polprevodniški kristal. Na poti skozi detektor namreč nabiti delci tvorijo pare elektron-vrzel, katerih število je sorazmerno energiji, ki jo delec izgubi (Kramberger, 1998). Proces je shematsko podan na sliki 2.1.



Slika 2.1: Prečni prerez silicijevega detektorja

V silicijevih detektorjih je povprečna energija, ki je potrebna za tvorbo enega para $3.6\ \text{eV}$, kar je red velikosti manj v primerjavi z ionizacijskimi celicami, pri čemer delci z najmanjšo ionizacijo izgubijo okrog $390\ \text{eV}/\mu\text{m}$. Ker je običajna debelina detektorja približno $300\ \mu\text{m}$, dobimo pri tej debelini v povprečju $3 \cdot 10^4$ parov elektron-vrzel, kar zadošča za merljiv signal. Treba pa je poudariti, da je v čistem siliciju z debelino $300\ \mu\text{m}$ in površino $1\ \text{cm}^2$, pri sobni temperaturi nekaj 10^8 prostih nosilcev naboja. Fluktuacije števila prostih nosilcev naboja so zato primerljive s signalom delca z najmanjšo ionizacijo (Kramberger, 1998). Zaradi te lastnosti, čisti silicij kot detektor ni primeren. Ena od možnosti za zmanjšanje koncentracije prostih

nosilcev naboja je hlajenje, ki pa ni najbolj praktično. Za povečanje razmerja signal/šum zato običajno izkoriščamo lastnosti stika p – n, saj lahko v njem ustvari območje brez prostih nosilcev naboja.

2.2 Osnovne značilnosti detektorjev

Stik p – n naredimo tako, da skupaj staknemo polprevodnik tipa p in polprevodnik tipa n. Rezultat je dioda, ki je osnovni element silicijevih detektorjev. Z vpletanjem donorskih ali akceptorskih atomov v kristalno mrežo vplivamo na število prostih nosilcev naboja. Elektroni s strani n prehajajo na stran p in se tam rekombinirajo z vrzeli, ki so večinski nosilci naboja na strani p. Obratno prehajajo vrzeli iz strani p na stran n, kjer se rekombinirajo z elektroni. Tako na strani n dobimo pozitivno nabite ionizirane donorje, na strani p pa negativno nabite ionizirane akceptorje. Ker so ti ioni del kristalne mreže, se ne morejo gibati, ustvarijo pa električno polje, ki ustavi proces difuzije. Ob stiku p – n se tako ustvari osiromašeno območje, kjer ni prostih nosilcev naboja. Ti so se namreč rekombinirali s prostimi nosilci naboja iz druge strani. Zato se tam ustvari potencialni skok V_n , ki ga povzročijo ionizirani akceptorski in donorski atomi, tipična vrednost za V_n pa je približno 1V. Ta potencialni skok pa lahko še povečamo, če na detektor priklopimo zunanjo zaporno napetost V_z . Tako celoten potencialni skok na detektorju označimo z $V_B = V_n + V_z$ (Dolenc, 2004). Spreminjanje potenciala in električnega polja na stiku p – n izračunamo s Poissonovo enačbo

$$-\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{\rho_e(x)}{\epsilon_{Si}\epsilon_0}. \quad (2.1)$$

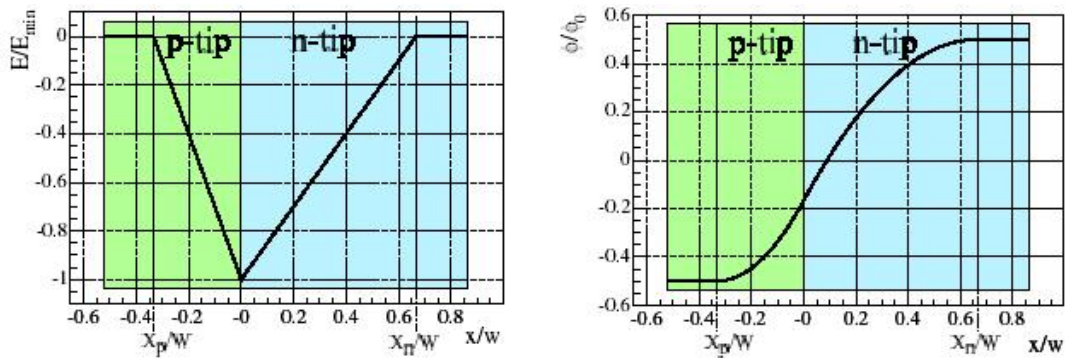
V tej enačbi je V potencial, ρ_e predstavlja gostoto električnih nabojev, ϵ_0 je splošna dielektrična konstanta in ϵ_{Si} je dielektrična konstanta silicijevega polprevodnika (Dolenc, 2004). Ob predpostavki, da v osiromašenem območju ni nosilcev naboja in so vsi atomi primesi ionizirani ter da njihova koncentracija ob stiku doživi nenaden skok, gostoto prostorskega naboja izrazimo kot

$$\rho_e(x) = \begin{cases} e_0 N_D, & x_n > x > 0 \\ -e_0 N_A, & -x_p < x < 0 \\ 0, & \text{sicer,} \end{cases} \quad (2.2)$$

kjer z x_p in x_n ponazorimo debelino osiromašenega območja na straneh p in n. Sledi rešitev prikazana na sliki 2.2. Vidimo lahko, da je koncentracija donorjev na strani n dvakrat manjša od koncentracije akceptorjev na strani p. Pri pogoju, da mora stik p – n ostati nevtralen, dobimo

$$N_A x_p = N_D x_n, \quad (2.3)$$

iz česar lahko vidimo, da je širina osiromašenega območja na obeh straneh p – n stika (x_p , x_n) obratno sorazmerna koncentraciji primesi na tisti strani.



Slika 2.2: Električno polje (levo) in potencial čez stik p – n v približku popolnoma osiromašene plasti. Na koordinati x je izražena debelina osiromašene plasti (w).

Pri silicijevih detektorjih je običajno koncentracija primesi na eni strani veliko večja kot na drugi. V večini primerov je to stran p ($N_A \gg N_D$), na kateri je širina osiromašenega območja precej manjša kot na strani n ($x_n \gg x_p$). Tako lahko približno določimo, da je debelina celotnega območja osiromašenja w enaka osiromašenemu območju na strani n ($w \approx x_n$) (Dolenc, 2004). V tem primeru lahko debelino osiromašenega območja izračunamo kot

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}\varepsilon_0 V_B}{e_0 N_D}}. \quad (2.4)$$

Za detektiranje nabitih delcev, ki prehajajo skozi detektor, uporabljamo pare elektron – vrzel, ki nastajajo pri prehodu skozi osiromašeno območje in jih loči električno polje. V ostalem delu detektorja, ki ni osiromašen, pa ni električnega polja in se zato naboj, ki nastane, rekombinira s prostimi nosilci naboja ter ga zato ne moremo zaznati. Območja osiromašenja in s tem možnosti zaznave delcev se, kot že prej omenjeno, poveča z dvigom zaporne napetosti V_z . Ko dosežemo, da se izpraznjeno območje razteza čez celoten detektor, dobimo največji signal. Prostih nosilcev naboja, ki lahko zakrijejo signal, namreč skoraj ni prisotnih. Zaporno napetost ki je potrebna za doseganje takega izpraznjenega območja, pa imenujemo napetost popolnega osiromašenja U_{po} . Napetost U_{po} je kvadratno odvisna od debeline detektorja D

$$U_{po} = \frac{e_0 N_D D^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_{Si}}. \quad (2.5)$$

U_{po} je napetost, pri kateri se osiromašeno območje razteza po celotni prostornini diode. Zaželeno je, da je ta napetost čim manjša (Kolar, 2000).

Stran n pogosto nima samo donorskih primesi, ampak tudi akceptorske. Zato je v tem primeru smiselno N_D v enačbah (2.4) in (2.5) nadomestiti z efektivno koncentracijo primesi $N_{eff} = |N_D - N_A|$, ta pa predstavlja razliko med koncentracijama plitvih donorjev in akceptorjev.

Na koncu vpeljimo še kapaciteto stika $p - n$, s pomočjo katere določamo U_{po} . Kapaciteta je definirana kot

$$C = \frac{dQ}{dV_B}, \quad (2.6)$$

kjer je dQ sprememba naboja, ko se napetost na diodi poveča za dV_B . dQ povezujemo s povečanjem osiromašenega območja dw in površino prečnega preseka diode S preko enačbe:

$$dQ = e_0 N_{eff} S dw. \quad (2.7)$$

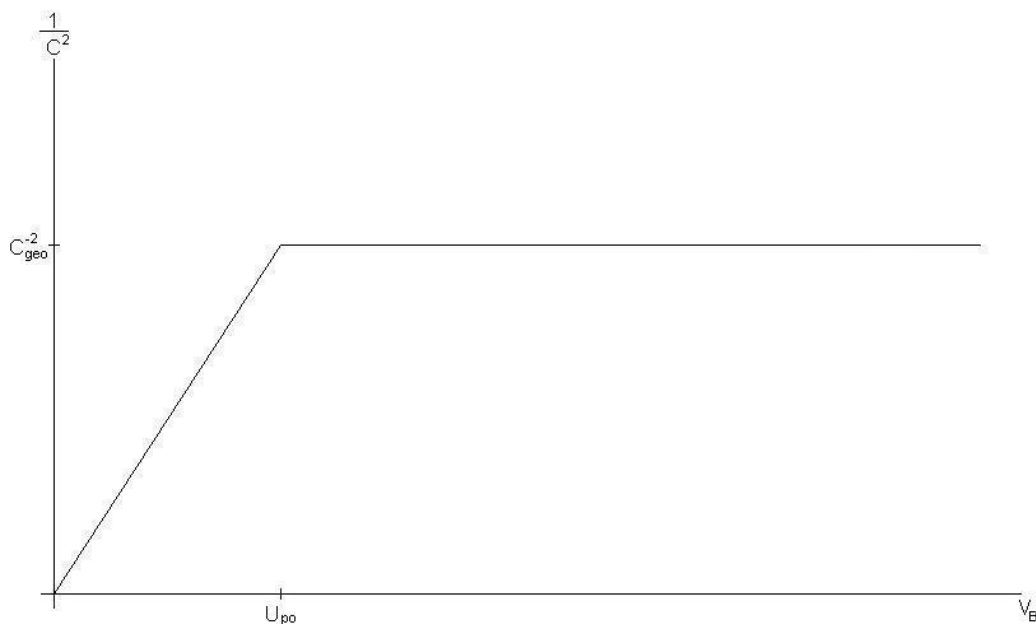
Z upoštevanjem (2.6) in (2.7) dobimo enačbo

$$C = S \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{Si}} \epsilon_0 \epsilon_0 N_{\text{eff}}}{2V_B}}, \quad (2.8)$$

kjer lahko vidimo, da se kapaciteta spreminja kot $V_B^{-1/2}$. To velja samo dokler nedosežemo napetosti popolnega osiromašenja U_{po} . Po tem, ko smo dosegli to točko, je namreč kapaciteta konstantna in znaša

$$C_{\text{geo}} = \epsilon_{\text{Si}} \epsilon_0 \frac{S}{w}. \quad (2.9)$$

Ta se imenuje geometrijska kapaciteta, saj je določena z geometrijo diode. Če narišemo $1/C^2$ v odvisnosti od V , dobimo graf, katerega idealni primer je prikazan na sliki 2.3. Napetost popolnega osiromašenja U_{po} je določena s kolenom (Kolar, 2000). Na ta način lahko z merjenjem kapacitete v odvisnosti od napetosti določimo napetost popolnega osiromašenja in s tem N_{eff} , ki se spreminja zaradi sevalnih poškodb.



Slika 2.3: C - V karakteristika za idealni primer

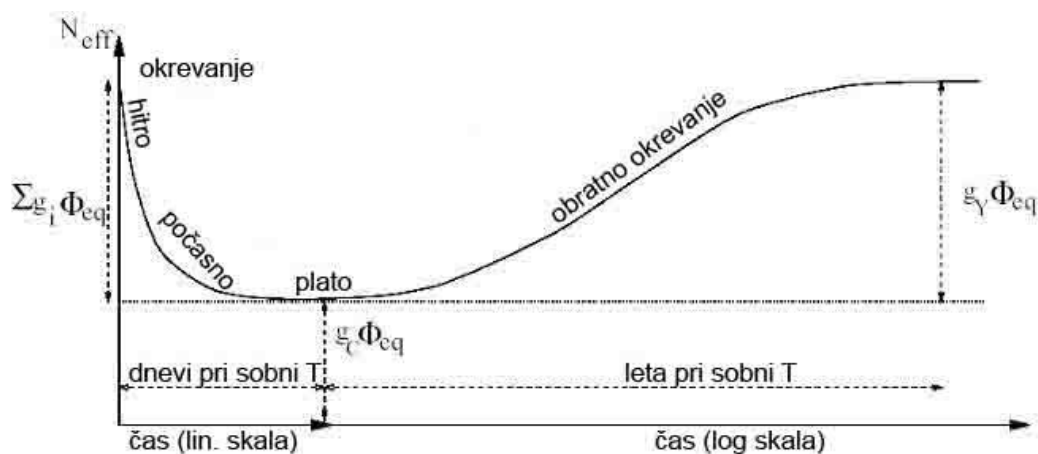
2.3 Značilnosti obsevanih detektorjev

Kot že omenjeno, pride po obsevanju v siliciljevi kristalni rešetki do poškodb, ki se odražajo kot energijski nivoji v prepovedanem pasu polprevodnika. Če so nabiti, se spremeni $|N_{\text{eff}}|$. Povečanje $|N_{\text{eff}}|$ ni zaželeno, saj pomeni dvig U_{po} . Pri visoki U_{po} pa moramo na detektor priključiti tudi visoko zaporno napetost, ki lahko, če je previsoka, povzroči preboj in uničenje detektorja. Ob prenizki zaporni napetosti pa ne dosežemo popolnega osiromašenja, kar povzroči nepopolno zbiranje naboja in s tem manjši signal. N_{eff} izračunamo iz enačbe (2.5) in dobimo

$$|N_{\text{eff}}| = \frac{2\varepsilon_{\text{Si}}\varepsilon_0 U_{\text{po}}}{e_0 D^2}. \quad (2.10)$$

Z obsevanjem se v silicijevem detektorju tipa n zmanjšuje začetna koncentracija primesi, vendar pri obsevanju z nevtroni za razliko od obsevanj s protoni ne gre proti nič. V snovi nastajajo primesi, ki imajo enake lastnosti kot akceptorji. Pri fluencah (integral toka delcev skozi detektor) nad $10^{13} \text{ n cm}^{-2}$ se zato tip silicija spremeni iz n tipa v p tip. V nekaterih silicijevih detektorjih proizvedenih na silicijevi rezini dobljeni s procesom Czochralski ali z epitaksialno rastjo na Czochralski substratu po obsevanju s hitrimi protoni namesto akceptorji nastajajo donorji.

Na sliki 2.4 je prikazano časovno spreminjanje efektivne koncentracije nečistoč v obsevanem polprevodniku.



Slika 2.4: Prikaz časovnega razvoja efektivne koncentracije nečistoč

Sprva se $|N_{\text{eff}}|$ zmanjšuje, kar imenujemo okrevanje, kasneje pa začne $|N_{\text{eff}}|$ zopet naraščati. Temu pravimo obratno okrevanje. Najmanjšo vrednost dosežene $|N_{\text{eff}}|$ po okoli 14 dneh na sobni temperaturi. Za razliko od $|N_{\text{eff}}|$ pa zaporni tok samo okreva. Graf časovnega okrevanja N_{eff} prikazanega na sliki 2.4 razložimo tako, da poškodbe, ki nastanejo pri obsevanju detektorja, glede na časovni razvoj razdelimo v tri skupine. V prvi skupini so obstojne poškodbe, ki nam določajo plato. V drugi skupini so električno aktivne poškodbe, ki se s časom spremenijo v električno neaktivne. Ti pripomorejo k ugodnemu okrevanju. V tretjo skupino razvrščamo električno neaktivne poškodbe, ki se spreminjajo v električno aktivne in so odgovorne za obratno okrevanje (Kolar, 2000).

Iz grafa lahko vidimo, da je časovna konstanta ugodnega okrevanja veliko krajša kot pri obratnem okrevanju. Okrevanje je odvisno od temperature, na kateri so se vzorci nahajali po obsevanju.

Kot je bilo nedavno ugotovljeno, poleg temperature na spreminjanje U_{po} vpliva tudi zaporna napetost. To je lastnost, na katero smo se osredotočili pri naši raziskavi.

Če poznamo N_{eff} lahko izračunamo napetost popolnega osiromašenja U_{po} kot

$$U_{\text{po}} = \frac{e_0 N_{\text{eff}}^{\text{skupna}} D^2}{2 \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{Si}}}. \quad (2.11)$$

Ta enačba je izpeljana iz formule (2.10). N_{eff} v enačbi (2.11) predstavlja poškodbe, ki nastanejo pri obsevanju detektorja, h katerim pa moramo prišteti še poškodbe, ki so posledica dodatne zaporne napetosti priključene na detektor. To prikažemo z enačbo

$$N_{\text{eff}}^{\text{skupna}} = N_{\text{eff}} + N_{\text{eff}}^{\text{bias}}. \quad (2.12)$$

Z izmerjenim $N_{\text{eff}}^{\text{bias}}$ izračunamo koeficient $g_b = N_{\text{eff}}^{\text{bias}} / \Phi_{\text{eq}}$ (2.13). Če je g_b neodvisen od fluence pomeni, da je proces tvorbe takšnih poškodb prvega reda. Če vstavimo (2.12) v (2.11) dobimo

$$U_{po} = U_{po}^0 + U_{po}^{bias}. \quad (2.14)$$

Iz te enačbe lahko razberemo, da je skupna U_{po} sestavljena iz U_{po}^0 , ki predstavlja napetost popolnega osiromašenja pred vklopom dodatne zaporne napetosti in po izklopu te napetosti ter U_{po}^{bias} , ki predstavlja dodatno napetost popolnega osiromašenja dobljeno medtem ko so detektorji priklopljeni na dodatno zaporno napetost. Seveda pa nam lahko enačba (2.14) služi tudi v obratni smeri. Če od skupne U_{po} odštejemo U_{po}^0 in dobimo U_{po}^{bias} . Prav merjenje U_{po}^{bias} in s tem g_b za različne silicijske detektorje je bila metoda, s katero smo ocenili radiacijsko trdnost detektorjev v določenih pogojih delovanja.

3 MERILNI SISTEM IN UPORABLJENI VZORCI

3.1 Merilni sistem

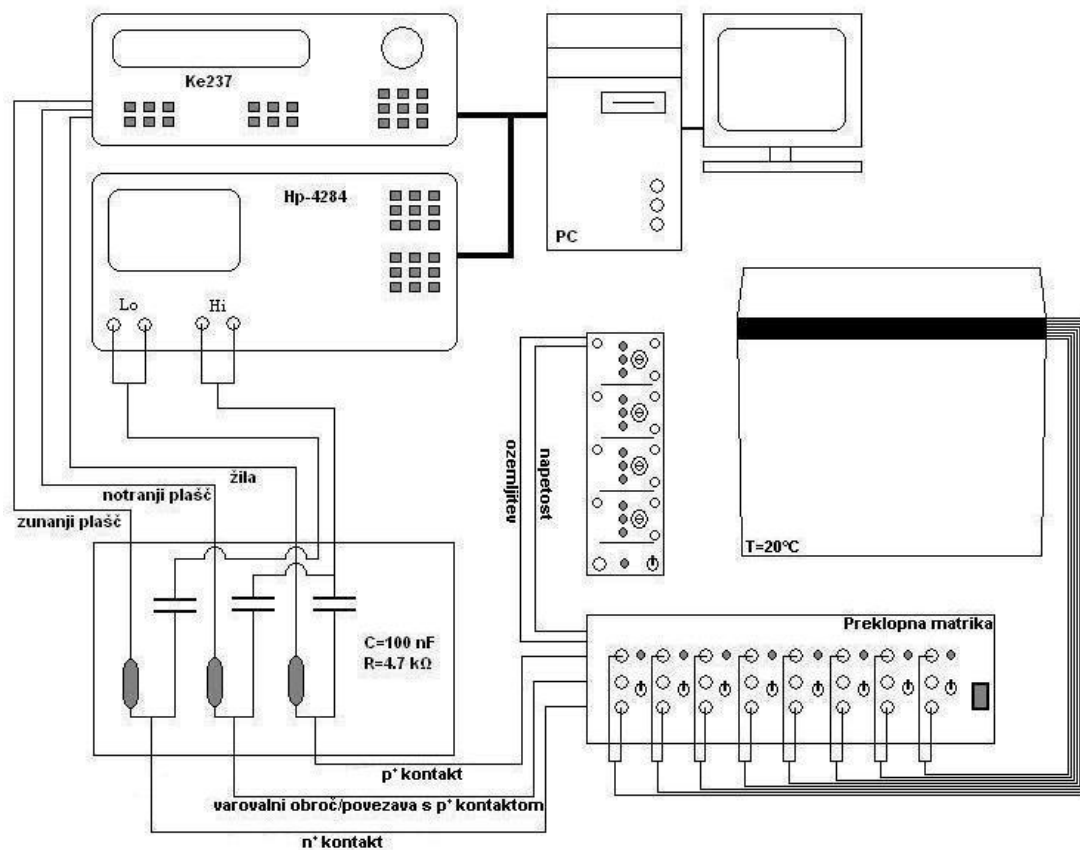
3.1.1 Opis merilnega sistema

Merjenje smo izvajali na merilnem sistemu (prikaz na sliki 3.1) postavljenem v laboratoriju Odseka za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev Instituta Jožef Stefan v Ljubljani.

Merilni sistem je sestavljen iz merilnika toka KEITHLEY 237, ki v našem primeru služi tudi kot izvor napetosti. Kapaciteto smo merili z merilnikom kapacitete HP-4284A. Kadar nismo merili kapacitete in zapornih tokov so bili detektorji priključeni na stalno napetost (DC) preko izvora Wentzel N 1130-4. Za preklon med merilnim sistemom in stalnim virom napetosti je skrbela preklonna matrika. Ta je omogočala priklop več vzorcev hkrati. Celotno delovanje merilnega sistema je bilo krmiljeno preko osebnega računalnika, na katerem je tekel merilni program v okolju LabView.

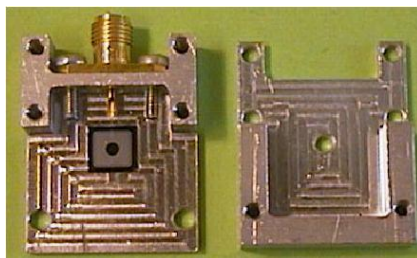
Kot lahko vidimo na sliki 3.1 je v merilnem sistemu tudi vezje sestavljeno iz kondenzatorjev in uporov (razklopni modul). Ker za osiromašenje sevalno poškodovanih silicijevih detektorjev potrebujemo visoko napetost (do 1000V), je potrebno vhode v merilnik kapacitete kapacitivno ločiti od visoke DC napetosti, saj le ta lahko poškoduje merilnik. To naredimo z visokonapetostnimi kondenzatorji. Upori pa preprečijo vpliv fluktuacij impedance napetostnega izvora na meritev.

Ker so vzorci občutljivi na svetlobo in bi to lahko vplivalo na rezultate meritev, smo jih postavili v zaprto posodo, ki nam je služila tudi za uravnavanje temperature. Ker so bile prejšnje meritve, s katerimi želimo primerjati naše rezultate, izmerjene pri 20°C, smo tudi mi izvajali meritve pri tej temperaturi (Kramberger, 2006).



Slika 3.1: Shema merilnega sistema

Vzorci smo za vključitev v merilni sistem pripravili tako, da smo spodnjo stran s prevodnim lepilom prilepili na aluminijasto ohišje, kot je prikazano na sliki 3.2, na zgornjo stran pa smo z ultrazvočnim bondiranjem pritrldili tanko žičko, ki nam je služila kot povezava za sklenitev tokokroga potrebnega pri meritvah.



Slika 3.2: Vzorec prilepljen v ohišju

Na spodnji del ohišja smo z vijaki pritrldili še zgornji del in tako dodatno zaščitili detektorje.

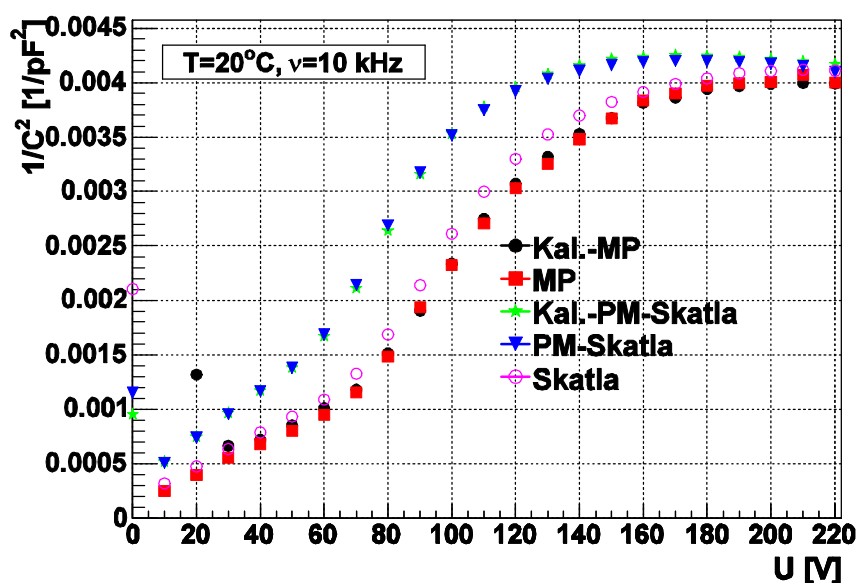
3.1.2 Kalibracija merilne naprave

Merilnik kapacitet izmeri celotno kapaciteto, ki jo vidi na vhodu. Poleg kapacitete silicijeve diode tako meri še kapacitete (in prevodnosti) elementov v razklopnem modulu, kapacitete kablov in kapaciteto preklopne matrike. Zato je potrebna kalibracija merilnika, ki izmeri kapaciteto celotnega merilnega sistema. Kalibracija poteka v treh korakih:

- meritev brez priključenega bremena,
- meritev s priključkoma v kratkem stiku,
- meritev znanega bremena (kondenzator in upor).

Kapaciteto merjenega vzorca določi tako, da od izmerjene kapacitete, ko imamo priključen vzorec, odšteje kapaciteto merilnega sistema. Izkazalo pa se je, da kalibracija, ko je na merilni sistem priključena preklopna matrika, ne deluje dobro. Izmerjene vrednosti kapacitet in s tem tudi napetosti popolnega osiromašenja vzorcev izmerjene na merilni postaji so se znatno razlikovale od vrednosti izmerjenih v škatlici priklopnjeni na matriko (slika 3.2). Rezultate prikazuje slika 3.3. Ker smo v prvem delu poskusa meritve opravili ročno na merilni postaji, smo lahko določili prave vrednosti napetosti popolnega osiromašenja. Avtomatske meritve, ki so nam dale podcenjeno vrednost napetosti popolnega osiromašenja vzorcev, smo nato popravili za konstantno vrednost (U_{kal}) in tako dobili dobro ujemanje med avtomatskimi in ročnimi meritvami. Vrednosti U_{kal} so bile za različne vzorce različne vendar nikoli večje kot 30V, kolikor je tudi znašal popravek za vzorec na sliki 3.3.

Meja med ročno izmerjenimi in rezultati izmerjenimi na merilnem sistemu je tudi lepo vidna v grafih pri opisu dobljenih rezultatov (naslednje poglavje). Opazna je predvsem iz pogostosti meritev, ki je po priključitvi na avtomatski merilni sistem veliko večja. Upravičenost prištetja U_{kal} potrjuje naklon, s katerim se spreminja U_{po} zaradi obratnega okrevanja pred in po izklopu konstantne napetosti, ki je podoben za avtomatske in ročne meritve.



Slika 3.3: Odvisnost $1/C^2$ od zaporne napetosti za različne konfiguracije meritev. Meritve preko preklopne matrike - PM (zeleni in modri trikotniki) se razlikujejo od meritev v merilni postaji - MP (črni krogi in rdeči kvadratici) in meritev v ohišju brez preklopne matrike (vijolični krogi).

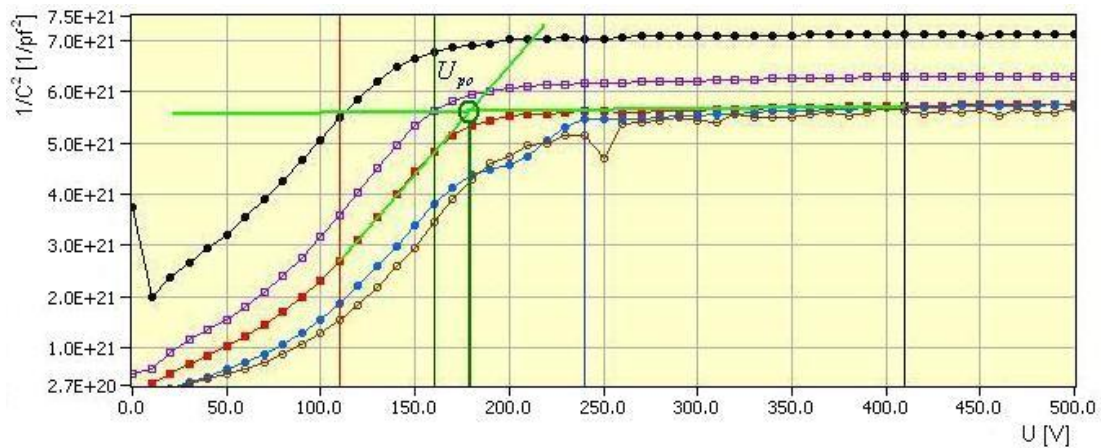
3.1.3 Način določanja napetosti popolnega osiromašenja

Napetost popolnega osiromašenja smo določili iz odvisnosti $1/C^2$ od zaporne napetosti. U_{po} lahko določimo iz presečišča premic, ki jih prilagajamo delu, kjer vrednost $1/C^2$ raste, in tistemu delu, kjer C doseže geometrijsko vrednost. Primer določitve je prikazan na slikah 2.3 in 3.4. Intervala, v katerih smo premici prilagajali, smo določili ročno in sta na sliki prikazana kot križca. Intervala smo pri vsaki točki spreminjali in iz tega ocenili spreminjanje U_{po} . Ocenjena napaka U_{po} zaradi takšne določitve intervalov je manj kot 5V.

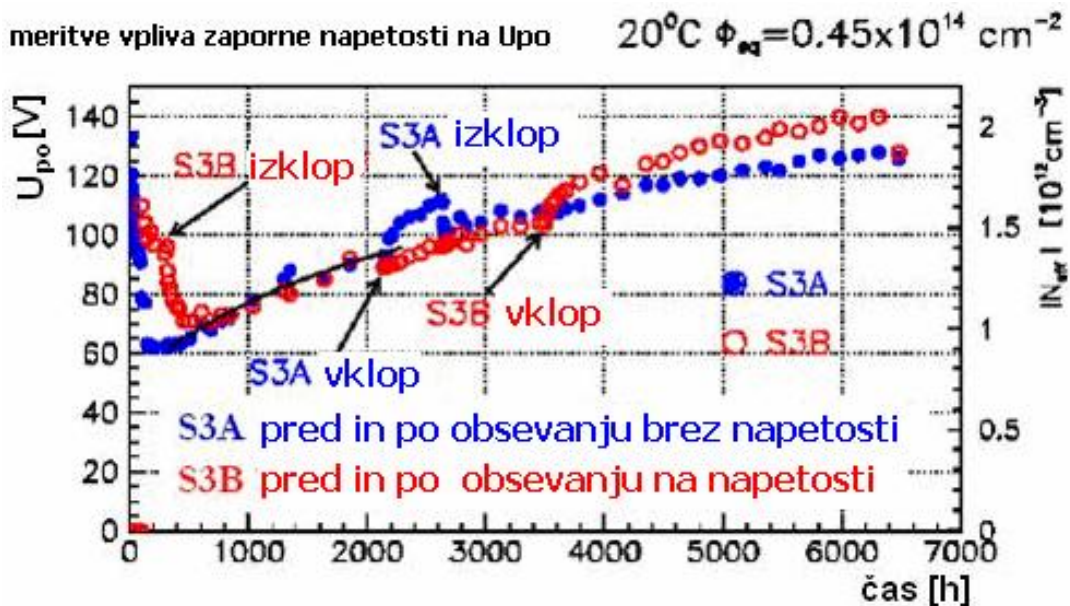
Pri neobsevanih detektorjih, kjer so energijski nivoji v prepovedanem pasu plitki, se meritve ujemajo s preprostim izračunom narejenim s formulo (2.5). Ta predpostavka ne drži pri obsevanih detektorjih, kjer imamo tudi globoke pasti. Časovne konstante polnjenja in praznenja teh pasti so namreč lahko dolge (do reda sekunde), zato je tudi merjena kapaciteta odvisna od frekvence, s katero jo merimo. V naših meritvah smo izmerili kapaciteto pri sedmih različnih frekvencah (1, 3, 10, 30, 100 kHz) (slika 3.4). Za določitev napetosti popolnega osiromašenja pri $T = 20^\circ\text{C}$ smo uporabili

samo frekvenco 10 kHz, ki je primerna za meritve U_{po} obsevanih detektorjev pri sobni temperaturi in omogoča primerljivost rezultatov. Pri tej frekvenci dobimo namreč najboljše ujemanje z napetostjo U_{po} dobljeno iz meritev signala. Meritve pri ostalih frekvencah služijo kot opora, saj se ob naraščanju toka lepo vidi, kdaj zaradi preboja postanejo meritve pri posamezni frekvenci neuporabne.

Pri poskusu smo želeli izmeriti spreminjanje U_{po} po priključitvi detektorjev na stalno zaporno napetost. Časovni potek lahko vidimo tudi na sliki 3.5, ki je rezultat starejših meritev (Kramberger, 2006).



Slika 3.4: Določanje napetosti popolnega osiromašenja iz odvisnosti $1/C^2$ od zaporne napetosti. Posamezne krivulje predstavljajo različne frekvence, ki si z vrha proti dnu sledijo s 100, 30, 10, 3 in 1 kHz. Z rdečimi kvadrati je označena $\nu=10$ kHz, pri kateri smo opravili analizo.



Slika 3.5: Odvisnost U_{po} od časa po obsevanju ($T=20^{\circ}\text{C}$) za dve diodi. Meritve v diplomskem delu se nanašajo na pojav dviga U_{po} po vklopu napetosti na S3A pri 2200h in S3B pri 3400h.

Zanima nas torej časovna odvisnost spreminjanja U_{po} , ki za natančen popis sprememb zahteva veliko število meritev.

3.2 Opis uporabljenih vzorcev

Pri našem poskusu smo uporabili devet silicijevev diod dimenzij $5 \times 5 \text{ mm}^2$ različnih debelin. Detektorji so imeli vsaj en varovalni obroč, ki preprečuje, da bi visoko električno polje doseglo rob detektorja. Skozi varovalni obroč teče površinski tok z roba detektorja.

Vse podrobnosti v zvezi s posameznimi detektorji najdemo v tabeli 1, kjer je po posameznih stolpcih prikazano ime vzorca, material in lastnosti, fluenca, pri kateri je bil detektor obsevan, kaj se je z detektorjem dogajalo pred poskusom ter proizvajalce, ki so vzorce procesirali. V drugem stolpcu je predstavljen način rasti silicijevega kristala in lastnosti posameznih diod. Za proizvodnjo silicijevev diod se večinoma uporablja silicij, ki je dobljen s procesom Float Zone (Standard FZ), lahko pa ga tudi dodatno obogatijo s kisikom (Diffusion Oxygenated FZ, DOFZ) in s tem izboljšajo odpornost na radiacijske poškodbe (Lindstrom, 2001). Do nedavnega je imel silicij, pridobljen z metodo Czochralski (Cz, Magnetic Cz),

premajhno upornost (imel bi prevelik U_{po}). Danes je mogoče dobiti takšne detektorje, ki jih je mogoče popolnoma osiromašiti že pri 400V ($U_{po} < 400V$). Tovrsten material ima za red velikosti več kisika kot DOFZ in bi moral biti še bolj odporen na radiacijske poškodbe. Prav tako so zanimive Si-rezine proizvedene z epitaksialno rastjo (Epi-Si), saj imajo ti detektorji prav tako veliko kisika. Poleg tega je v drugem stolpcu predstavljen še tip diode, njena debelina in upornost. V tretjem stolpcu lahko vidimo da imata dva vzorca vsak po dve fluenci, eden pa tri. V teh primerih smo uporabili dva oziroma tri različne vzorce istega tipa, in jih obsevali pri različnih fluencah. Zgodovina v četrtem stolpcu pa prikazuje, koliko ur so bili vzorci na sobni temperaturi preden smo začeli z meritvami.

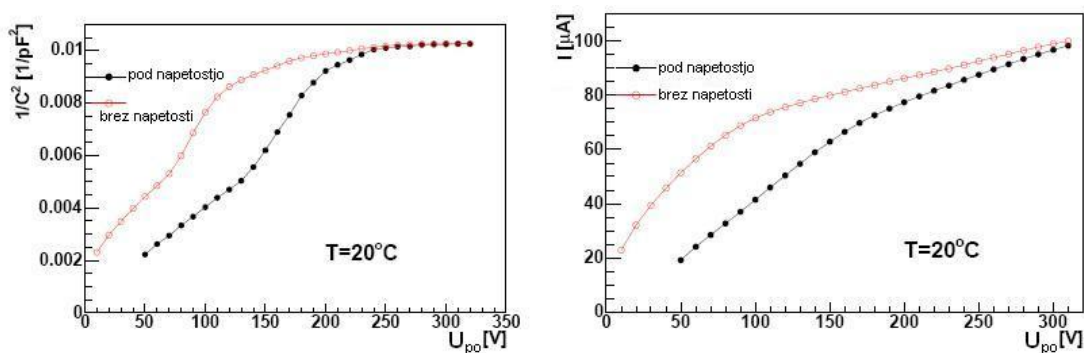
Tabela 1: Opis in lastnosti uporabljenih vzorcev

Ime vzorca	Material, lastnosti	Φ_{eq} [$1e14 /cm^2$]	Zgodovina	Proizvajalec
W339_2	STFZ, n-tip, 300 μm , 15 k Ωcm	1 n	~ 2000 na ST	STM, Catania, Italija
P503n7	STFZ, n-tip, 300 μm , 2 k Ωcm	1 n	~ 500 na ST	STM, Catania, Italija
Cz36	MCz, n-tip, 300 μm , 1 k Ωcm	0,62 p; 3,1 p	~ 500 na ST	Helsinki Institute of Physics, Helsinki, Finska
W301PS1	DOFZ, n-tip, 300 μm , 1 k Ωcm	1,09 p	~ 500 na ST	STM, Catania, Italija
5337_03_14	Cz, n-tip, 300 μm , 1 k Ωcm	0,75 p	~ 500 na ST	CiS, Erfurt, Nemčija
6837_07	Epi-Si, n-tip, 75 μm , 50 Ωcm	13 p, 10 n, 6 n	~ 20000 na ST	CiS, Erfurt, Nemčija
5856_01	Epi-Si, n-tip, 50 μm , 50 Ωcm	20 n, 10 n	~ 20000 na ST	CiS, Erfurt, Nemčija

4 REZULTATI MERITEV

4.1 Primerjava izmerjene kapacitete in toka med poskusom

Rezultate meritev naj na začetku predstavim s kratko razlago našega dela na grafičnem primeru. Na sliki 4.1 lahko na levem grafu vidimo vpliv dodatne zaporne napetosti na odvisnost kapacitete od napetosti in posledično spremembo napetosti popolnega osiromašenja. Za vzorec ($Cz36$, $\Phi_{eq} = 51014/\text{cm}^2$) je razlika v zaporni napetosti, pred vklopom napetosti 300V in 140 ur po vklopu, okoli 80V. Da bi čimbolj skrajšali čas med meritvijo, ko je del detektorja neosiromašen, smo po priklopu zaporne napetosti vse meritve kapacitete začeli pri napetosti, potrebni za osiromašenje vsaj polovice detektorja (50V na sliki 4.1).

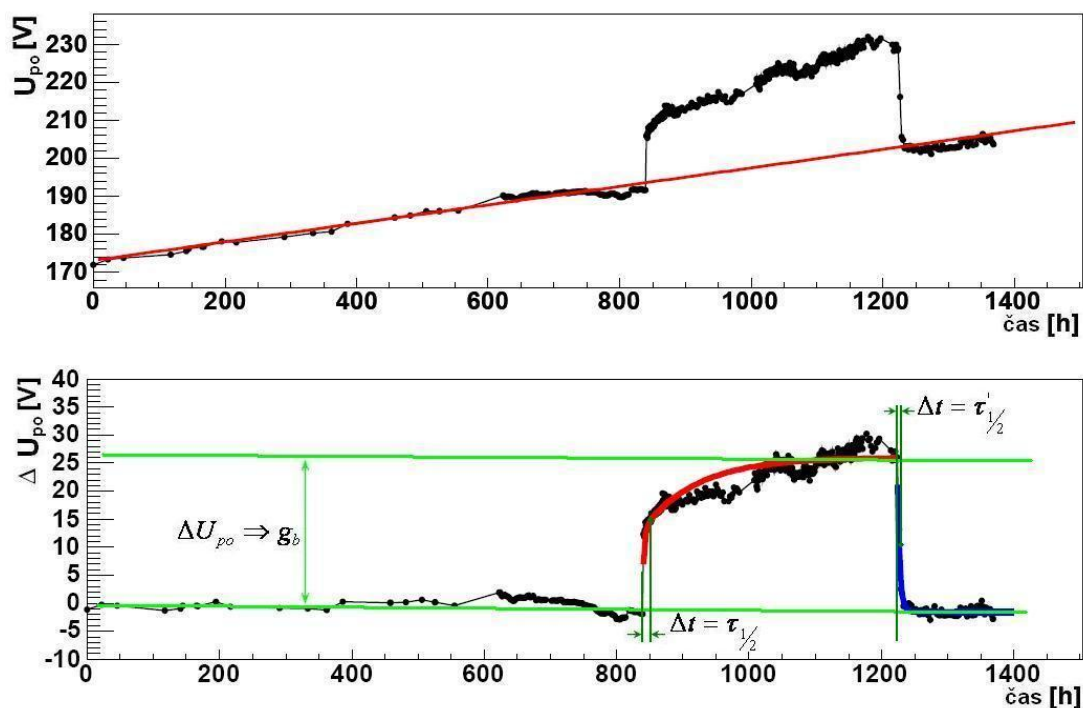


Slika 4.1: Vpliv napetosti na tok

Poleg kapacitete smo hkrati merili tudi zaporni tok. Na desnem grafu slike 4.1 vidimo odvisnost zapornega toka od napetosti pred in po vklopu zaporne napetosti. Ker je merjeni tok vsota zapornega toka in toka skozi varovalni obroč, karakteristika ni idealna, vendar je kljub temu razvidno, da se tok zaradi napetosti ne poveča. Za $U > 300\text{V} > U_{po}$ postaneta zaporna tokova enaka. Prav tako lahko iz oblike odvisnosti toka od napetosti določimo napetost popolnega osiromašenja. Obe krivulji imata koleno pri $U \sim U_{po}$.

4.2 Rezultati meritev vpliva zaporne napetosti na napetost popolnega osiromašenja uporabljenih vzorcev

Po obsevanju se N_{eff} in s tem U_{po} spreminja s časom, kot je to prikazano na sliki 2.4 za detektorje, ki so po obsevanju spremenili predznak prostorskega naboja (n-tip \rightarrow p-tip). Takšni so bili do nedavnega vsi detektorji. Po obsevanju s protoni pa MCz in Epi-Si detektorji ne spremenijo predznaka prostorskega naboja. Nasprotno, pozitivni prostorski naboj se z obsevanjem še povečuje. Ker se med obratnim okrevanjem tvorijo efektivni akceptorji, v prvem primeru U_{po} narašča, v drugem pa pada. Primer odvisnosti U_{po} od časa za detektor W339_2, ki je zaradi radiacijskih poškodb prešel iz n-tipa v p-tip, je na sliki 4.2. Vidimo, da $|N_{\text{eff}}|$ narašča s časom do točke, kjer vklopimo zaporno napetost. Zaradi tega U_{po} še dodatno naraste, kar je bilo v prvih objavah razloženo z aktivacijo akceptorjev zaradi električnega polja. Ob tem je potrebno povedati, da je bila konstantna zaporna napetost na detektorju 300V vedno večja od U_{po} preučevanih vzorcev.

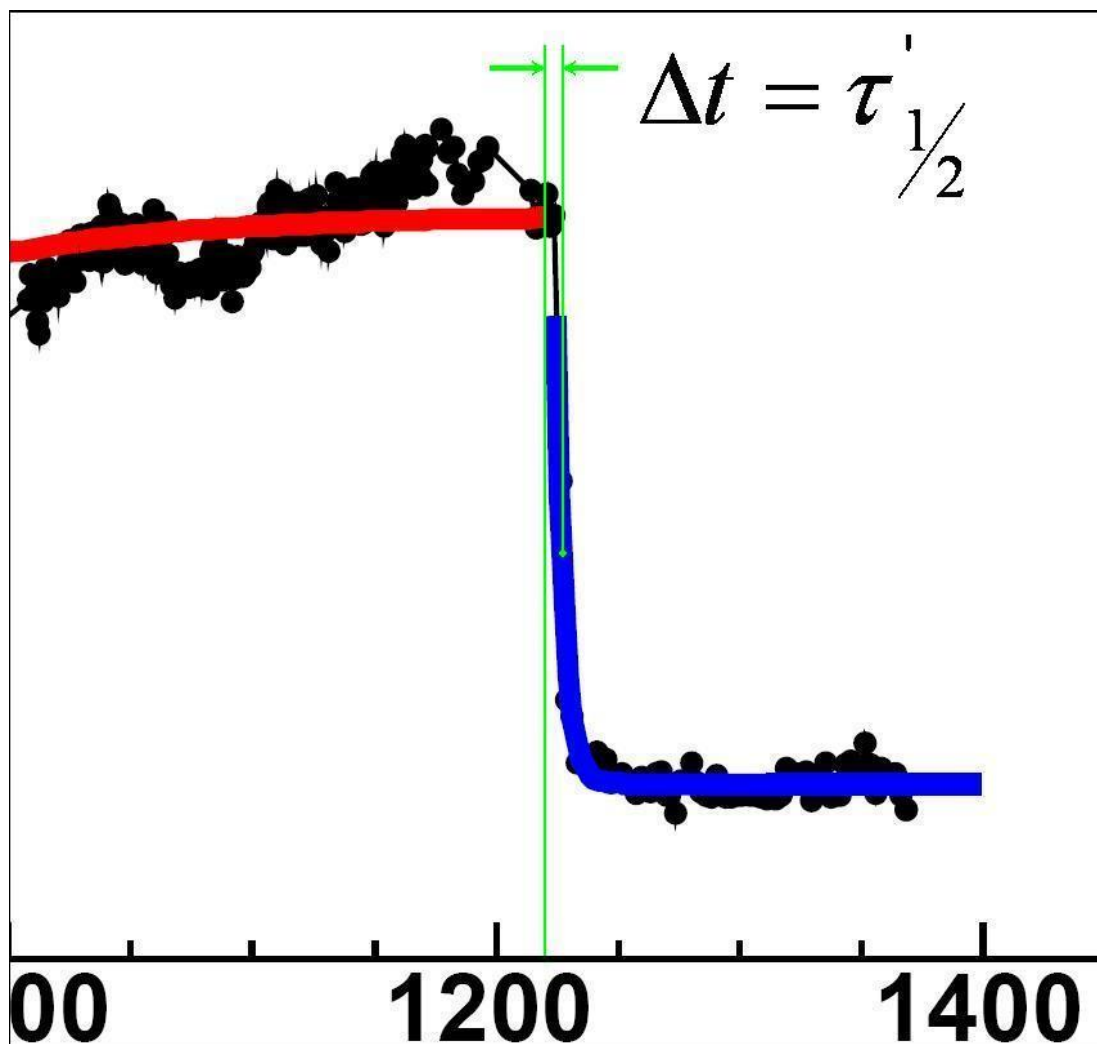


Slika 4.2: Prikaz rezultata poskusa (zgoraj) in razlaga posameznih delov grafa

Pri analizi rezultatov je prikladno ločiti naraščanje U_{po} zaradi obratnega okrevanja od tistega, ki je posledica vklopa dodatne zaporne napetosti. V ta namen prilagajamo premico meritvam U_{po} pred vklopom in nato ekstrapoliramo vrednosti na čas po vklopu dodatne zaporne napetosti. Merjeni U_{po} odštejemo ekstrapolirano U_{po}^0 , ki bi jo dobili, če vklopa ne bi bilo. Tako dobljena razlika ΔU_{po} nam podaja spremembo U_{po}^{bias} zaradi priključene zaporne napetosti. Prikazana je na sliki 4.2 (spodaj). Vidimo, da se U_{po} spremeni hitro po vklopu napetosti. Za lažji prikaz poteka U_{po} je ta označen z rdečo barvo. Ker smo, da bi se izognili vplivu samega merjenja na dejanski U_{po} , meritve takoj po vklopu opravljali vsakih 20 min, bi bilo težko poiskati model, ki bi opisal dogajanje takoj po vklopu. Namesto tega smo ocenili dvizni čas kot čas, ki je potreben, da dosežemo delež celotne amplitude skoka. Tudi po skoku napetost počasi narašča, vendar so te spremembe majhne. Celotno amplitudo U_{po}^{bias} smo določili tako, da smo določili nivo, do katerega je prišla U_{po} po vsaj 400 urah na $T = 20^\circ\text{C}$. Od tod smo dobili

$$g_b = \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \Delta U_{po}}{\Phi \cdot D^2}. \quad (4.1)$$

Določitev g_b je prikazana na sliki 4.2. Napaka določitve je ocenjena na 10%. Izbira parametra g_b nam omogoča primerjavo med vzorci različnih debelin in obsevanih do različnih fluenc. Na spodnjem grafu slike 4.2 sta podrobneje označena tudi dvizni čas $\tau_{1/2}$ in čas spusta $\tau'_{1/2}$ napetosti popolnega osiromašenja takoj po vklopu in takoj po izklopu dodatne zaporne napetosti. $\tau_{1/2}$ nam prikaže čas, ki je potreben, da dosežemo 50% skoka U_{po} ob vklopu dodatne zaporne napetosti. $\tau'_{1/2}$ pa nam prikazuje čas, ki je potreben, da dosežemo 50% spusta U_{po} , ki je posledica izključitve zaporne napetosti. Del grafa, ki prikazuje padanje, in vse oznake uporabljene pri podrobnejšem opisu tega dela grafa, lahko vidimo na sliki 4.3.



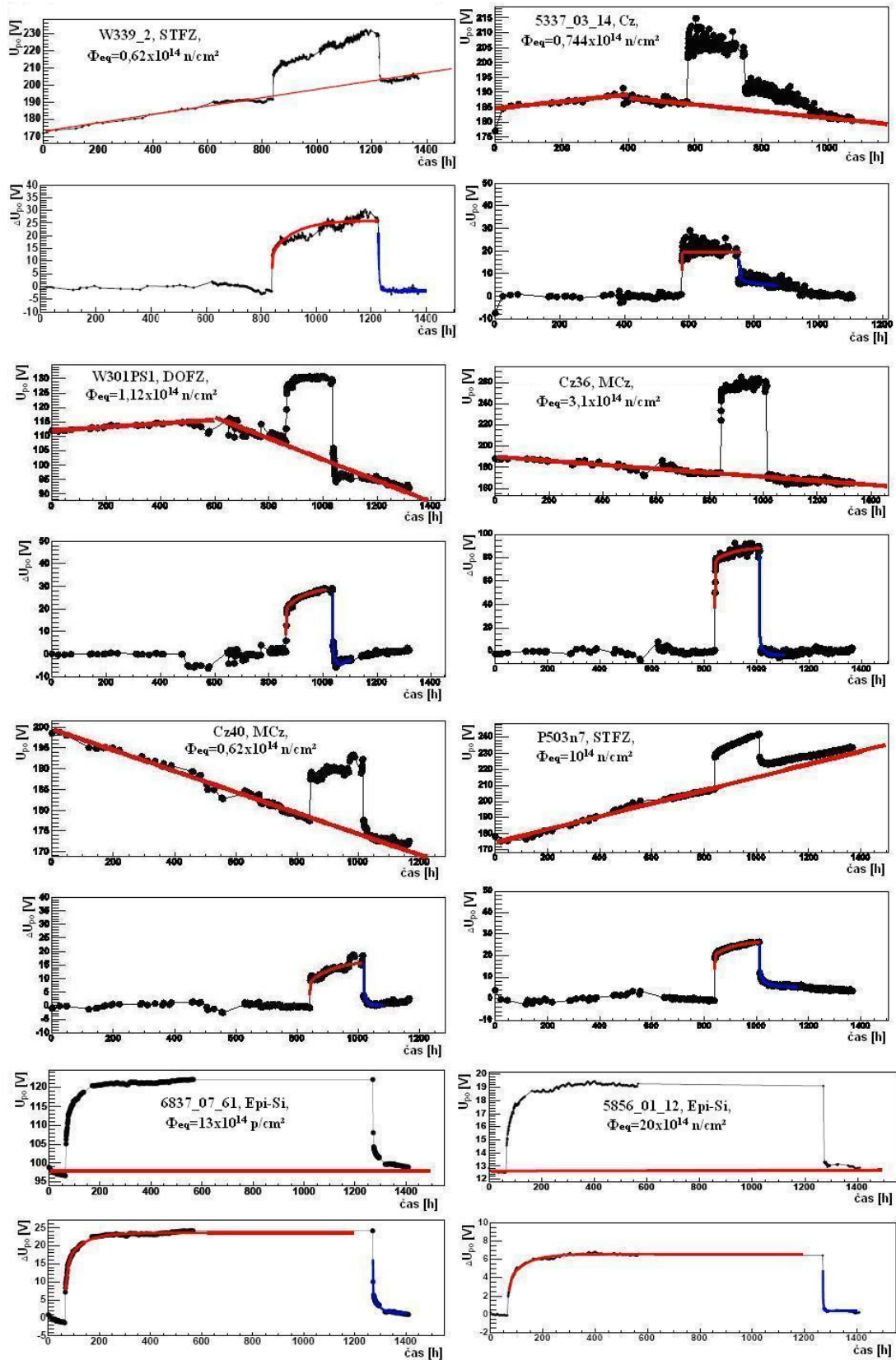
Slika 4.3: Podroben prikaz padanja napetosti popolnega osir omašenja po izklopu dodatne zaporne napetosti

Potek U_{po} za merjene vzorce je prikazan na sliki 4.4. Vidimo lahko, da je potek obratnega okrevanja različen pri Cz/MCz vzorcih obsevanih s protoni, saj U_{po} s časom pada in ne raste. Po vklopu dodatne zaporne napetosti smo pričakovali, da bo napetost dodatno padla, saj naj bi električno polje aktiviralo akceptorje. Izkazalo se je, da je napetost še dodatno zrasla, kar pomeni, da je prispevek k prostorskemu naboju zaradi poškodb odvisnih od zaporne napetosti, vedno enakega predznaka kot prostorski naboj. Torej U_{po} po priključitvi na dodatno zaporno napetost vedno naraste ne glede na prostorski naboj. Kakšne bi bile te poškodbe in kaj je razlog za takšno obnašanje, ni jasno.

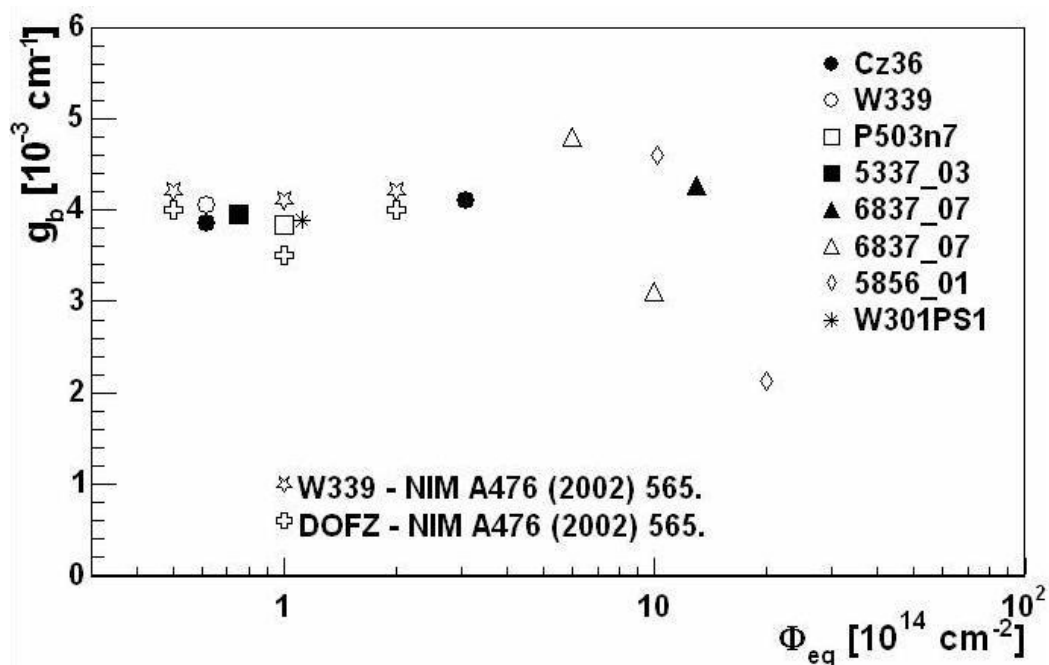
Tukaj je potrebno pojasniti potek U_{po} za vzorca 5337_03_14 in W301PS1, ki sta bila blizu točke, kjer se konča okrevanje in začne obratno okrevanje, zato je lepo videti prelom v poteku U_{po} pred in po vklopu. Iz oblike poteka lahko sklepamo, da sta oba vzorca tudi po obsevanju n-tipa.

Izmerjene vrednosti $\tau_{1/2}$ se za različne vzorce med seboj razlikujejo, vrednosti $|g_b|$ pa so za vse vzorce precej podobne, kar lahko vidimo na sliki 4.5. Te vrednosti se ujemajo tudi s preteklimi meritvami, prav tako prikazanimi na sliki, ki pa so bile opravljene na detektorjih procesiranih na FZ rezinah in obsevanih tudi do več kot velikostni red manjših fluenc. Le pri zelo velikih fluencah smo zaznali odstopanje pri g_b vzorca obsevanega do $20 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ nevtronov. Zanimiv je vzorec Cz36, kjer je zaradi visoke fluence tudi zelo velik $\Delta U_{po} \sim 90 \text{V}$, čeprav je g_b približno enak kot pri ostalih vzorcih. Tu je lepo viden pojav, ko je prispevek k U_{po} zaradi zaporne napetosti primerljiv z U_{po} pred vklopom.

Neodvisnost g_b od fluence (slika 4.5) opravičuje našo hipotezo, da je dodatni prispevek k efektivni koncentraciji naboja zaradi dodatne zaporne napetosti linearno povezan s fluenco. Med vzorci smo imeli tudi detektor P503n7, ki je imel nizko koncentracijo kisika ($< 5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$) in povišano koncentracijo ogljika ($> 5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$). Če je za pojav kriva povečana koncentracija ogljika, bi morali pri tem vzorcu izmeriti večji g_b , vendar temu ni bilo tako. Glede na to lahko trdimo, da je g_b neodvisen od koncentracije ogljika in kisika (vzorci MCz, Cz in W301PS1). Izkazalo se je tudi, da g_b ni odvisen od tipa delca s katerim obsevamo detektorje, saj so imeli vzorci (glej tabelo 1) obsevani s protoni in nevtroni podobne g_b . Vsi rezultati dobljeni ob izračunu oziroma določanju vrednosti, ki so prikazane na sliki 4.2, so prikazani v tabeli 2.



Slika 4.4: Rezultati poskusa vseh uporabljenih vzorcev



Slika 4.5: Faktor spremembe napetosti popolnega osiromašenja s fluenco obsevanja

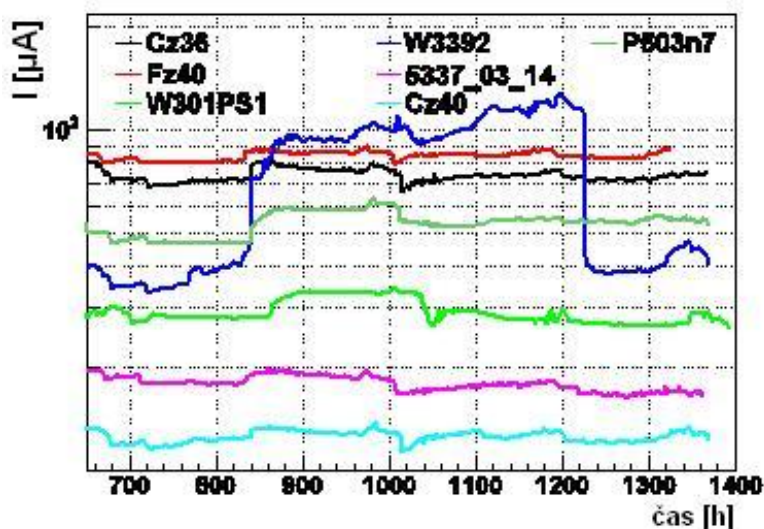
Ker so napake pri določitvi $\tau_{1/2}$ velike, izmerjene vrednosti služijo le kot ocena velikostnega reda. Trdimo lahko, da sta dvižni čas in čas spusta pri $T = 20^\circ\text{C}$ okoli 1 ure. Iz meritev je razvidno, da je čas naraščanja pri epitaksialnih detektorjih daljši in znaša reda velikosti nekaj 10 ur, pri nekaterih epitaksialnih vzorcih pa celo nekaj 100 ur. Čas spusta je nekako primerljiv z ostalimi vzorci.

Tabela 2: Rezultati dobljeni pri določanju g_b , $\tau_{1/2}$ ter $\tau'_{1/2}$

Ime vzorca	g_b [$/10^3 \text{ cm}$]	$\tau_{1/2}$ [h]	$\tau'_{1/2}$ [h]	Φ_{eq} [$1e14 / \text{cm}^2$]
W339_2	4,04	2,35	4,67	0,62 n
P503n7	3,83	0,72	1,10	1,00 n
Cz36	4,10	2,42	0,75	3,10 p
W301PS1	3,85	1,35	0,67	1,12p
5337_03_14	3,95	0,27	0,67	0,744 p
Cz40	3,85	0,80	0,67	0,62 p
6837_07	4,20	87,83	23,92	13,0 p
6837_07	3,05	58,83	10,62	10,0 n
6837_07	4,80	242,73	754,45	6,00 n
5856_01	4,60	267,10	15,82	10,0 n
5856_01	2,10	239,68	19,77	20,0 n

4.3 Vpliv zapornega toka pri meritvah

Pri CV meritvah, kjer smo merili kapaciteto in nato iz teh rezultatov določali napetost popolnega osiromašenja, smo hkrati merili tudi zaporni tok. Zanimalo nas je, kako se tok spreminja skozi čas in če pride do kakšne spremembe, ko vzorce priključimo na stalno zaporno napetost.



Slika 4.6: Spremembe zapornega toka

Naše ugotovitve kažejo, da se tok določen pri U_{po} na uporabljenih vzorcih v obdobju poskusa ni skoraj nič spreminjal, kar je razvidno tudi s slike 4.6. Pri vseh vzorcih pride sicer do manjšega poskoka ob vklopu na stalno zaporno napetost, vendar je to le posledica višje U_{po} . Ker merjeni tok tudi za $U > U_{po}$ še vedno narašča zaradi toka skozi varovalni obroč, pomeni določitev toka pri večji napetosti hkrati tudi nekaj večji tok, če pa primerjamo tokova pri enaki napetosti, je ta celo nižji. Tok nam lahko služi tudi za nadzor temperature. Zaradi toka in priključene zaporne napetosti se namreč troši moč. Če detektor ne bi bil v dobrem toplotnem stiku z okolico, bi se grel, kar bi opazili v povečanju toka. Ker tega ni, lahko rečemo, da je bila temperatura med meritvami stabilna.

Tukaj je potrebno omeniti vzorec W339_2, kjer je tok skozi varovalni obroč močno zrasel in je za nekajkrat presegel zaporni tok. Razloga za takšen porast toka skozi varovalni obroč nismo uspeli podrobno preučiti.

5 ZAKLJUČEK

Osnovna ugotovitev podkrepljena z rezultati dobljenimi v prvem delu našega poskusa je, da se tudi obsevanim silicijevim detektorjem, ki so narejeni na drugačnih rezinah (MCz, Cz in Epitaksialni), ob priključitvi na dodatno zaporno napetost poveča napetost popolnega osiromašenja.

Prav tako smo ugotovili, da se N_{eff} poveča zaradi dodatne zaporne napetosti na detektorju za $N_{\text{eff}} = g_b \cdot \Phi_{\text{eq}}$. Zaradi tega se poveča napetost popolnega osiromašenja v skladu z enačbo (2.14). Izkazalo se je tudi, da porast U_{po} zaradi dodatne zaporne napetosti ni odvisen od tipa delcev, s katerimi obsevamo detektor.

g_b , ki smo ga dobili po izračunu iz izmerjenih rezultatov, ni odvisen od fluence, s katero obsevamo detektor.

Zaradi dodatne zaporne napetosti vedno dobimo porast U_{po} , kar pomeni, da je tip poškodb (n ali p), ki jih aktiviramo z dodatno zaporno napetostjo vedno enak tipu silicija (n ali p) predno priključimo napetost. To je v nasprotju s prvotno hipotezo, da se U_{po} v detektorjih z negativnim prostorskim nabojem še dodatno poveča, v tistih s pozitivnim pa zmanjša.

Časi naraščanja napetosti popolnega osiromašenja po vklopu dodatne zaporne napetosti so reda velikosti 1 ure (pri določanju teh rezultatov, ki so prikazani v tabeli 2, smo upoštevali 90% dosežene vrednosti), razen pri Epi-Si detektorjih, kjer je pri nekaterih čas naraščanja 10 ur, pri drugih pa 100 ur. Časi izklopa pa so podobni časom vklopa.

Ker sta prispevka N_{eff} in $N_{\text{eff}}^{\text{bias}}$ pri materialih ki so narejeni na drugačnih rezinah (MCz, Epi-Si), postala primerljiva, je relativni porast U_{po} velik. Vsak scenarij delovanja detektorjev mora to tudi nujno upoštevati.

Žal lahko sklenemo le, da trenutno ni razlage, katere poškodbe (defekti) bi bili odgovorni za ta pojav, je pa to, kot tudi vse ostale ugotovitve, lahko dobro izhodišče za morebitne nadaljne raziskave.

6 LITERATURA

[1] **A. Peisert**, Silicon microstrip detectors. Padova: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova, 1992.

[2] **Czochralski process**. Pridobljeno s svetovnega spleta:
http://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski_process

[3] **D. Žontar**, Študij sevalnih poškodb silicijevih detektorjev za eksperimente z visoko luminoznostjo na trkalniku LHC, Doktorska disertacija, Ljubljana, 1998. (Pridobljeno s svetovnega spleta: <http://krambi.ijs.si/gregor/papers/zokidr.pdf>)

[4] **Epitaxial silicon**. Pridobljeno s svetovnega spleta:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Epitaxial>

[5] **Float-zone silicon**. Pridobljeno s svetovnega spleta:
http://en.wikipedia.org/wiki/Float-zone_silicon

[6] **G. Kramberger**, Karakterizacija analognih bralnih sistemov za silicijeve mikropasovne detektorje v spektrometru ATLAS, Magistrsko delo, Ljubljana, 1998.

[7] **G. Kramberger**, Signal development in irradiated silicon detectors, Doktorska disertacija, Ljubljana, 2001, (Pridobljeno s svetovnega spleta: http://krambi.ijs.si/gregor/papers/dok_eng.pdf)

[8] **G. Kramberger, V. Cindro, I. Mandič, D. Šuligoj, M. Mikuž**, Effect of bias voltage on full depletion voltage measured for different materials, Predstavljeno na "9th CERN-RD50 - Workshop on Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders", Ženeva, 16-18 Oktober, 2006.

[9] **G. Lindstrom, M. Ahmed, S. Albergo in drugi**, Radiation hard silicon detectors - developments by the RD48 (ROSE) collaboration, Nuclear instruments & methods in physics research section A – Accelerators spectrometers detectors and associated equipment 466 (2) 308-326, 2001.

- [10] **I. Dolenc**, Delovanje silicijevih detektorjev v visoko sevalnem okolju, Ljubljana, 2004 (Pridobljeno s svetovnega spleta: <http://www-f9.ijs.si/~cindro/seminars/seminarirenadolenc.pdf>)
- [11] **I. Puljak**, CMS detector i fizika Higgs bozona, Zagreb, 2001. (Pridobljeno s svetovnega spleta: http://www.phy.hr/~picek/semistec/puljak_prezentacija2.pdf)
- [12] **J. Kolar**, Meritve popuščanja sevalnih poškodb v silicijevih detektorjih, Diplomsko delo, Ljubljana, 2000.
- [13] **V. Cindro, G. Kramberger, M. Mikuž, D. Žontar**, Bias-dependent annealing of radiation damage in neutron-irradiated silicon $p^+ - n - n^+$ diodes, Nuclear instruments & methods in physics research section A – Accelerators spectrometers detectors and associated equipment 419 (1) 132-136, 1998.
- [14] **V. Cindro, G. Kramberger, M. Mikuž, M. Tadel, D. Žontar**, Bias-dependant radiation damage in high-resistivity silicon diodes irradiated with heavy charged particles, Nuclear instruments & methods in physics research section A – Accelerators spectrometers detectors and associated equipment 450 (2-3) 288-296, 2000.