UNIVERZA V LJUBLJANI FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO ODDELEK ZA FIZIKO TEHNIČNA SMER

Mitja Krnel

Meritve signalov v obsevanih silicijevih pasovnih detektorjih

DIPLOMSKO DELO

MENTOR: doc.dr. Igor Mandić

<u>Uvod</u>

- pasovni detektorji se uporabljajo za sledenje nabitih delcev
- primer: eksperiment ATLAS na trkalniku LHC v Cernu
- v času delovanja bodo izpostavljeni preletu hadronov, ki jih bodo poškodovali
- poškodbe spremenijo lastnosti detektorjev

Diplomsko delo:

- meritve lastnosti obsevanih pasovnih Si detektorjev in primerjava z neobsevanim
 - Cilj: : preveriti učinkovitost zbiranja naboja po površini

polprevodniški detektor = "dioda priključena na zaporno napetost"

- osnova za detekcijo: osiromašeno področje p-n stika (ni prostih nosilcev naboja)
- v osiromašenem področju imamo prostorski naboj N_{eff} = |N_D N_A| (poz. donorji N_D in neg. akceptorji N_A)
- področje povečamo z zaporno napetostjo \rightarrow V_{FD}
- prelet nabitega delca skozi področje povzroči nastanek parov elektron-vrzel
- ob zunanji napetosti pari potujejo proti elektrodam \rightarrow influencirajo signal
- v neobsevanem detektorju pri napetosti nad V_{FD} zberemo ves naboj

dioda:



električnega polja)

Električno polje dobimo z integriranjem Poissonove enačbe:

$$-\frac{d^2}{dx^2}V(x) = \frac{q_0}{\varepsilon_{Si}\varepsilon_0} \cdot N_{eff}$$

Efektivna gostota prostorskega naboja N_{eff} $V_{FD} = \frac{q_0}{2\varepsilon_{Si}\varepsilon_0} \cdot |N_{eff}| \cdot D^2$

Napetost popolnega osiromašenja V_{FD} De

Debelina detektorja D

Mikropasovni Si detektorji

- pozicijsko občutljivi polprevodniški detektorji
- zgornji del detektorja segmentiran v pasove
- signal največji na pasu v bližini mesta preleta

primer: n+-p mikropasovni detektor



Signali

- posledica potovanja elektronov in vrzeli v el. polju
- tok (signal) v obsevanem detektorju opisuje Ramov teorem:



utežno polje E_w je odvisno od geometrije detektorja

- zbran naboj je časovni integral signala
- na signal in zbran naboj vpliva količina sevanja, čas okrevanja, pomnoževanje naboja

<u>Vpliv sevanja</u>

- količino prejetega sevanja opišemo s fluenco = število nevtronov na cm²
- ekvivalentna fluenca Φ_{eq} pomeni fluenco nevtronov z energijo 1 MeV, ki povzroči enake poškodbe v detektorju kot dana fluenca hadronov

• sevanje poškoduje kristalno mrežo Si:

e)	f)	g)	h)
0000	0000	0000	0000
0000	0000	0 0 0	0000
0 00	0 0 0	0 0 0	0 00
0000	0000	0000	0000
a)	b)	c)	d)
0000	0000	0000	0000
0000	0000	0000	0 0 0
0000	$\circ \bullet \circ \circ$	0000	$\circ \bullet \circ \circ$
0000	0000	0000	0000

Posledica sevalnih poškodb je sprememba lastnosti:

- poveča se koncentracija prostorskega naboja N_{eff} in s tem napetost V_{FD}
- poveča se zaporni tok
- nastale poškodbe delujejo kot pasti za naboj, zato se zmanjša učinkovitost zbiranja naboja
- spremeni se upornost detektorja

<u>Vpliv časovnega okrevanja</u>

• koncentracija prostorskega naboja N_{eff} je odvisna od fluence, časa in temperature:

$$N_{eff}(\Phi_{eq}, t, T) = \Phi_{eq}[\sum_{t} g_t f_t(t)(1 - P_t(T)) - \sum_{t} g_t f_t(t) P_t(T)] + g_t f_t(t) P_t(T)] + g_t f_t(t) P_t(T) + g_t f_t(t) P_t(T) + g_t f_t(t) P_t(T) + g_t f_t(t) P_t(T)] + g_t f_t(t) P_t(T) P_t(t) P_t(t) + g_t f_t(t) P_t(t) P_t(t) P_t(t) P_t(t) + g_t f_t(t) P_t(t) P_t$$

globoki donorji globoki akceptorji

$$+ N_D(\Phi_{eq}) - N_A(\Phi_{eq}).$$

• spreminjanje N_{eff} s časom:



 pri T=60 °C je koristno okrevanje približno 250-krat hitrejše, obratno okrevanje pa približno 550-krat hitrejše kot pri T=20 °C

Pomnoževanje naboja

- če E > 15 V/µm \rightarrow večkratna ionizacija \rightarrow pomnoževanje elektronov
- to se zgodi pri močno obsevanih detektorjih, saj je $E_{
 m max} \propto N_{
 m eff} \propto \Phi_{
 m eq}$

$$E_{\max} = -\frac{e_0 N_A w_p}{\varepsilon_0 \varepsilon_{Si}}$$

- \bullet pojav močnejši po dolgih časih okrevanja, ker dolgo okrevanje povečuje N_{eff}
- primer: oblika polja za detektor obsevan do 1·10¹⁶ n/cm², debeline 300 µm, 5 pasov:
 → polje izračunano z numeričnim reševanjem Poissonove enačbe



MERITVE

<u>Detektorji</u>

- n⁺p tip, 300 µm debeline, površina 4x4 mm²
- razdalja med pasovi: 80 µm
- širina pasu: 20 µm

Posebnost:

 pasovi v dolžini 400 µm niso prevlečeni s kovino prevlečeni s kovino pasov z laserjem

- 2. Pasovi so povezani med sabo:
- ➔ signal je vsota influenciranih tokov na vseh pasovih
- detektorji obsevani z nevtroni v reaktorju TRIGA do fluence 1·10¹⁵ n/cm², 2·10¹⁵ n/cm², 5 ·10¹⁵ n/cm²



detektor:

povečano:



Merilna metoda

• TOP-TCT:

- simulacija preleta nabitega delca s pomočjo laserja
- fokusirani sunki IR laserske svetlobe



- laser usmerjen pravokotno na površino detektorja
- signali se generirajo po celotni globini detektorja
- merimo signal na določenih mestih, predvsem okolica pasov

X

1_Z

- detektor premikamo po korakih (servomehanizem)
- koordinatni sistem : osi x in y vzporedni s površino vzorca, os z pravokotna

Postavitev TOP-TCT eksperimenta





TOP-TCT meritve

<u>Neobsevan detektor: scan čez površino detektorja (korak x: 2.5 µm, y: 50 µm)</u> zaporna napetost U = 100 V, V_{FD} = 80 V \rightarrow osiromašen

signal:



• signal na vseh mestih, kjer ni kovine, približno enak

naboj = integral pulza v času 25 ns (offline)

 \rightarrow tudi naboj na vseh mestih, kjer ni kovine, približno enak:

3D prikaz naboja:



2D prikaz naboja:



Obsevani detektorji

- obsevani do fluence a) 1.10¹⁵ n/cm², b) 2.10¹⁵ n/cm², c) 5.10¹⁵ n/cm²
- V_{FD} nad 1000 V, U = 200,400,600,800,1000 V → delno osiromašeni
- po obsevanju: okrevanje pri temperaturi 60 °C za 80, 320, 1280, 5120 min ponavljanje meritve po vsakem koraku okrevanja

naboj, U=1000 V, pred okrevanjem:



U=1000 V, po 5120 min okrevanja:



• naboj se dodatno poveča po okrevanju (pri vseh fluencah)

Obsevani detektorji: območje, kjer ni kovine, daleč od roba

naboj vzdolž koordinate x:



5.10¹⁵ n/cm² 0 min

5120 min



- naboj narašča z napetostjo
- variacije naboja naraščajo z napetostjo
- variacije naboja po okrevanju so največje pri detektorju obsevanem do 2·10¹⁵ n/cm²
- naboj se po okrevanju najbolj poveča ob robu pasov

spreminjanje naboja s časom okrevanja pri U = 1000 V v točkah na sliki d):



- po zadnjem koraku okrevanja naboj naraste zaradi pomoževanja
- do pomnoževanja pride pri vseh treh fluencah
- naboj najmočneje naraste ob robu implanta

signali za $\Phi_{eq} = 2.10^{15} \text{ n/cm}^2$, U = 1000 V, 5120 min. okrevanja v točkah b):



- povečanje naboja je povezano z razširitvijo signala
- k signalu pomembno prispevajo nosilci, ki pripotujejo v bližino implanta zaradi pomnoževanja

Obsevani detektorji: dogajanje ob robu

 $\Phi_{\rm eq}$ = 1 $\cdot 10^{15}~n/cm^2$,U = 1000 V:



naboj v bližini zaščitnega obroča narašča z okrevanjem pri vseh časih

signali za $\Phi_{eq} = 5 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$, U = 1000 V, 5120 min. okrevanja v točkah b):



- bližje kot smo koncu pasu, večji postaja tokovni pulz, pojavi se dodaten vrh
- prvi vrh nastane zaradi gibanja naboja takoj po laserskem sunku
- drugi vrh nastane, ko elektroni dosežejo vogal implanta, kjer se pomnožijo
- čas med položaji drugih vrhov približno ustreza času 0.5 ns

<u>Zaključek</u>

- meritve učinkovitosti zbiranja naboja po površini detektorja s posebej izdelanimi detektorji (vpliv napetosti in časa okrevanja)
- meritve potrjujejo domnevo, da je naraščanje naboja po dolgem času okrevanja posledica pomnoževanja naboja
- pomnoževanje poveča variacije zbranega naboja glede na oddaljenost od pasov
- močno pomnoževanje je omejeno na majhno področje, zato je zbiranje naboja odvisno od mesta preleta delca
- po obsevanju se poveča zbran naboj v bližini zaščitnega obroča (pomnoževanje)
- največji naboj izmerjen na vogalih implantov
 → znaki pomnoževanja naboja (obnašanje po okrevanju, vpliv napetosti, ...)

Hvala za pozornost

Dodatno:

Q-TCT metoda:

- simulacija preleta nabitih delcev s hitrimi elektroni iz izvira ⁹⁰Sr
- ⁹⁰Sr seva minimalno ionizirajoče elektrone, z maksimalno energijo 2274 keV
- merimo odloženo energijo, ki je sorazmerna odloženemu naboju
- najverjetneje odložen naboj dobimo s prilagajanjem konvolucije Landauove in Gaussove porazdelitve na spekter
- 75 parov elektron-vrzel na µm debeline detektorja

Postavitev Q-TCT eksperimenta





Q-TCT meritve

spekter odložene energije:



TOP-TCT meritve: območje prekrito s kovino

Primer: neobsevan detektor, U = 100 V



Signal različen od 0 tudi na območju kovine \rightarrow profil svetlobe ima repe

Spaghetti detektorji:

→ pasovi povezani med sabo → merimo **vsoto** signalov iz vseh pasov

 \rightarrow dodani prispevki sosednjih pasov, ki imajo nasproten predznak

→ variacija učinkovitosti zbiranja naboja v spaghetti detektorjih je manjša

Hamamatsu detektor obsevan do 10¹⁵, ~5000 min na 60 °C, samo en pas priključen na ojačevalec:



Okrevanje in obratno okrevanje

$$\Delta N_{eff}(t) = g_c \Phi_{eq} + \Phi_{eq} \left(\sum_{\substack{okrevanje \\ okrevanje }} g_a e^{-\frac{t}{\tau_a}} + \sum_{\substack{obratno \\ okrevanje }} g_{ra} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{ra}}}) \right) +$$

$$+ \Phi_{eq}(N_D(0) - N_D(\Phi_{eq}) - N_A(0) + N_A(\Phi_{eq})),$$



 $g_a \sim g_c = 0.017 \text{ cm}^{-1}, \ g_Y = g_{ra} = 0.052 \text{ cm}^{-1}$

Potovalna hitrost v siliciju

 $\mu = \mu(E,T)$

300K

250K



Pri nizkem polju: $\nu(T) = \mu(T) \cdot E$

gibljivost elektrona ... 1500cm2/v s gibljivost vrzeli 450cm2/v s v_{sat} 1e07cm/s