



Posudek oponenta diplomové práce Bc. Valentiny Raskiny

Název diplomové práce:	Characterization of the ALPIDE silicon sensor
Autor diplomové práce:	Bc. Valentina Raskina
Studijní obor:	Experimentální jaderná a částicová fyzika
Vedoucí diplomové práce:	RNDr. Filip Křížek, Ph.D.
Konzultant diplomové práce:	Svetlana Kushpil, CSc.
Oponent diplomové práce:	RNDr. Jiří Kroll, Ph.D.

Pixelové křemíkové senzory typu ALPIDE vyvinuté kolaborací experimentu ALICE pro Run 3 urychlovače LHC, ale také Run 4 urychlovače HL-LHC, představují v současnosti jednu z nejzajímavějších aplikací technologie Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS) v částicové fyzice. Vzhledem k očekávaným hodnotám TID a NIEL v oblasti vnitřního dráhového detektoru experimentu ALICE během Run 3 a Run 4 je nezbytné detailně studovat vliv radiačního poškození na základní vlastnosti senzoru ALPIDE, jako je detekční účinnost či prostorové rozlišení detektoru.

Diplomová práce se zabývá studiem vlivu ozáření detektoru ALPIDE svazkem protonů o energii 30 MeV na kritické vlastnosti tohoto detektoru. Celková úroveň a rychlost ozáření detektoru ALPIDE byly přitom zvoleny tak, aby co nejpřesněji simulovaly reálné podmínky experimentu ALICE. Ozařování detektoru bylo provedeno na cyklotronu U-120M, který je instalován v Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Řeži, a probíhalo v definovaných časových intervalech od září 2016 do května 2019. Během ozáření byly průběžně sledovány parametry protonového svazku, ale zejména charakteristiky ALPIDE detektoru, jako je závislost středního nábojového prahu, analogového a digitálního proudu detektoru či detektorového šumu na celkové obdržené dávce, resp. celkové fluenci. Detekční vlastnosti ALPIDE detektoru byly následně studovány pomocí testovacího svazku pionů o energii 6 GeV v CERN PS test beam facility. S pomocí dedikovaného teleskopu se podařilo změřit detekční účinnost či prostorové rozlišení detektoru ALPIDE po jeho ozáření na desetinásobek hodnoty TID a NIEL očekávané experimentem ALICE během Run 3 a Run 4.

Práce obsahuje úvod, pět kapitol a závěr. První kapitola popisuje základní vlastnosti křemíkových detektorů částic, jejich detekční principy a mechanismy radiačního poškození těchto detektorů. Druhá kapitola se již věnuje upgradu vnitřního dráhového detektoru experimentu ALICE a konkrétním specifikacím pixelového křemíkového detektoru ALPIDE. Zmiňuje také požadavky kolaborace ALICE na charakteristiky detektoru. Ve třetí kapitole nalezneme podrobný popis experimentálního uspořádání a průběhu ozařovací kampaně na cyklotronu U-120M v Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Řeži. Čtvrtá kapitola hodnocené práce je zdaleka nejrozsáhlejší a obsahuje výsledky analýzy experimentálních dat získaných jak během ozařovací kampaně na cyklotronu U-120M, tak během test beam kampaně v CERN PS test beam facility. Autorka v této kapitole specifikuje detailní parametry ozařovací kampaně,



jako jsou hodnoty TID a NIEL dosažené v jednotlivých ozařovacích intervalech. Následuje studium vlivu sekundárních neutronů na měřenou hodnotu NIEL pomocí simulace v nástroji Geant4. Stěžejní část kapitoly pak tvoří podrobná analýza vlivu protonového ozáření na střední nábojový práh a na parametry FE elektroniky, které tento práh přímo ovlivňují. Analyzován je také vliv ozáření na analogový a digitální proud detektoru. Speciální pozornost je následně věnována veličině fake-hit rate, jenž popisuje pravděpodobnost, že daný pixel detekuje průchod částice aniž by tato částice pixelem prošla. Hodnota fake-hit rate pak společně s detekční účinností zásadně ovlivňuje nastavení nábojového prahu v různých stádiích radiačního poškození detektoru. Poslední část čtvrté kapitoly se věnuje analýze experimentálních dat z test beam měření, přičemž popisuje hlavní kroky rekonstrukce změřených drah pomocí nástroje EUTelescope. Nejdůležitější výstupy této analýzy jsou pak shrnuty v závěru kapitoly, kdy je prezentována závislost detekční účinnosti, fake-hit rate, střední velikosti detekčních klastrů a prostorového rozlišení na zvoleném nábojovém prahu. Pátá kapitola stručně seznamuje čtenáře s testovacími procesy aplikovanými kolaborací ALICE na již sestavený vnitřní dráhový detektor před jeho instalací do samotného experimentu.

Rozsah a variabilita experimentální práce autorky je nadstandardní. Autorka se musela seznámit s ozařovací aparaturou instalovanou na cyklotronu U-120M v Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Řeži, ale také s test beam měřicí aparaturou umístěnou na CERN PS obsahující komplikovaný systém dráhového teleskopu. Za účelem posouzení vlivu sekundárních neutronů na NIEL se musela naučit pracovat se simulačními knihovny Geant4. Rekonstrukce drah pionů změřených test beam teleskopem pak vyžadovala osvojení práce v rekonstrukčním software EUTelescope. Veškerá analýza dat pak probíhala v nástroji ROOT. Z práce není zcela zřejmé, zda se na všech experimentálních kampaních podílela autorka osobně. Veliký rozsah experimentální práce je však jasný. Velice kladně hodnotím také detailní popis technických detailů ozařovací aparatury a průběhu celé ozařovací kampaně. Na druhou stranu technický popis test beam aparatury by vzhledem k její komplexnosti mohl být podrobnější.

Analýza experimentálních dat je dobře zpracovaná. Grafy a tabulky uvedené v diplomové práci jsou přehledné a dostatečně srozumitelné. Je zřejmé, že autorka práce si osvojila analytické nástroje a postupy běžně používané v této oblasti fyziky. Práce obsahuje poměrně velké množství zajímavých a jistě důležitých výsledků. Čtenář, který není odborníkem na experiment ALICE a jeho technické detaily, však může v práci postrádat detailnější interpretaci jednotlivých výsledků získaných pro detektor ALPIDE a jejich zasazení do kontextu celého experimentu ALICE, viz také doplňující otázky.

Po grafické a jazykové stránce je práce velice vydařená. Práce je dobře strukturovaná, bez větších jazykových chyb či překlepů, rozsahem je nadprůměrná. Je také třeba ocenit, že je práce napsaná v pohodlně čitelné angličtině na dobré úrovni. V tomto ohledu bych pouze vytknul přítomnost nepřírozeně velkých odsazení, které se v textu místy vyskytují, a jsou pravděpodobně způsobeny přítomností poměrně velkého množství nezalamitelných objektů (obrázky, tabulky, apod.).



Celkově je práce na velice dobré úrovni a několik výtek zmíněných výše v textu nijak nesnižuje její kvalitu ani význam autorčiných původních výsledků. Diplomovou práci proto **doporučuji** k její obhajobě a po jejím úspěšném průběhu ji navrhuji hodnotit **známkou A (výborně)**.

Nakonec předkládám k zodpovězení následující doplňující otázky:

1. Je u ALPIDE detektoru nezbytné aplikovat vyprazdňovací napětí (v práci zmiňujete napětí -3 V)? Bude napětí -3 V použito také v experimentu ALICE?
2. Pokud je šířka citlivé části senzoru pouze 18 - 30 μm , jaký je pak typický sebraný náboj?
3. Na obrázku 3.11 je uveden změřený gaussovský profil protonového svazku pouze v jedné ose. Je svazek symetrický v obou osách?
4. Ozařování zjevně neprobíhá při záporných teplotách a dochází tak k annealingu senzoru. Je během annealingu kontrolována teplota a čas, nebo je annealing náhodný? Jak toto koresponduje s reálnými podmínkami v experimentu ALICE?
5. Na začátku čtvrté kapitoly je zmíněno, že senzor A4W7G7R38 měl v průběhu ozařování nižší radiační odolnost než druhý ozařovaný senzor R41. Vychází tento závěr ze skutečnosti, že u senzoru R38 je rychlejší pokles analogového proudu v průběhu ozařování?
6. S rostoucí TID a NIEL klesá poměrně výrazně nábojový práh senzoru. Jakým mechanismem je tato změna způsobena (změřené změny chování parametrů V_{GASN} a zejména I_{THR} tuto změnu pravděpodobně nevysvětlují)? Má na změnu změřené hodnoty nábojového prahu vliv nárůst fake-hit rate s ozářením?
7. V grafech 4.9 a 4.10 je patrné, že v ozařovacích intervalech mezi 12/2016 a 4/2017 dochází k nárůstu středního nábojového prahu a v období mezi ozařovacími kampaněmi naopak tento práh klesá, což je zcela opačné chování než u zbylých dat. Jaké je vysvětlení tohoto chování?
8. Jak se měří separátně proud na zdroji analogového a digitálního obvodu? Jsou analogové a digitální části obvodu napájeny separátně?



9. Z obrázku 4.32 se zdá, že ozářený senzor nebyl testován chlazený, nýbrž při pokojové teplotě. Jak tyto testovací podmínky odpovídají reálným podmínkám v experimentu ALICE? Jaký je vliv teploty na fake-hit rate?
10. V závěru práce uvádíte, že výsledky získané z test beam ukazují na splnění požadavků kolaborace na kvalitu senzoru. Z grafu 4.36 je však zřejmé, že v oblasti prahů splňujících podmínku na účinnost vs fake-hit rate je rozlišení detektorů vyšší než je požadováno kolaborací, navíc také pro neozářený senzor. Podobně průměrná cluster size je v této oblasti prahů lehce pod limitem.
11. Pro ALPIDE požaduje kolaborace průměrnou cluster size >2 . Jak je vyšší průměrná cluster size využita v reálném experimentu?
12. Integrační čas ALPIDE detektoru je cca 4 us, což je výrazně rychlejší než např. u MAPS senzoru Mimosas26 (využíván v EUDET test beam teleskopech), ale stále limitující pro použití s dráhovými detektory ATLAS či CMS, které pracují na LHC frekvenci 40 MHz. Bylo by možné snížit integrační čas u ALPIDE detektoru, přestože by to bylo na úkor vyšší spotřeby detektoru?

V Praze dne 24.08.2020

.....
RNDr. Jiří Kroll, Ph.D
Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.
Na Slovance 1999/2
182 21 Praha 8
Česká republika
Tel: +420737588553
Email: jiri.kroll@cern.ch