

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Lucia Mészárosová

Testování křemíkových detektorů pro modernizaci detektoru ATLAS

Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí studentské práce: doc. RNDr. Zdeněk Doležal, Dr.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: obecná fyzika

Praha 2014

Chcela by som sa poďakovať doc. RNDr. Zdeňkovi Doležalovi, Dr. za umožnenie vypracovania tejto bakalárskej práce, za sprostredkovanie literatúry a celkovú ochotu. Takisto ďakujem Ing. Marcele Mikeščíkovej, Ph.D. za umožnenie prístupu do jej laboratória na testovanie detektorov a hlavne za ochotu a pomoc pri meraní a spracovávaní.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 19.5.2014

Název práce: *Testování křemíkových detektorů pro modernizaci detektoru ATLAS*

Autor: *Lucia Mészárosová*

Katedra / Ústav: *Ústav částicové a jaderné fyziky MFF UK*

Vedoucí bakalářské práce: *doc. RNDr. Zdeněk Doležal, Dr., ÚČJF MFF UK*

Abstrakt: Cílem bakalářské práce je popis připravovaného experimentu ATLAS Upgrade a jeho porovnání s původním ATLASem, popis připravovaného rutinního testování detektorů a vlastní testování prototypů stripových křemíkových detektorů pro ATLAS Upgrade. Práce je rozdělena do tří kapitol. První kapitola je věnována obecně výzkumnému zařízení CERN, konkrétně současnému detektoru ATLAS, jeho vnitřnímu detektoru a stripovým křemíkovým polovodičovým detektorům. V další části se charakterizuje plánovaný ATLAS Upgrade a opět jeho vnitřní detektor a stripové detektory. V závěru téhle části se nachází přehledné porovnání ATLASu a ATLASu Upgrade. Poslední kapitola se zabývá testováním detektorů, nejdřív rutinnímu testování detektorů v minulosti, pak plánovanému rutinnímu testování a nakonec jsou popsána samotná naše měření prototypů stripových křemíkových detektorů pro ATLAS Upgrade prováděná na FZÚ AV ČR pod vedením Ing. Marcely Mikeščíkové, Ph.D.

Klíčová slova: *křemíkové detektory, experiment ATLAS, experiment ATLAS Upgrade, testování detektorů*

Title: *Tests of Silicon Detectors for the ATLAS Detector Upgrade*

Author: *Lucia Mészárosová*

Department: *Institute of Particle and Nuclear Physics*

Supervisor: *doc. RNDr. Zdeněk Doležal, Dr., IPNP*

Abstract: The main goal of this bachelor thesis is to describe upcoming experiment ATLAS Upgrade and to compare it with present ATLAS, to describe upcoming tests of detectors and our own tests of prototypes of strip silicon detectors for the ATLAS Upgrade. Thesis is divided into three chapters. The first chapter is dedicated to the research facility CERN, specifically the present detector ATLAS, its inner detector and strip silicon detectors. In the next part there is characterized planned detector ATLAS Upgrade and again its inner detector and strip detectors. In the end of this part there is a tabular comparison of ATLAS and ATLAS Upgrade. The last chapter deals with the testing of detectors, at first routine testing of detectors in the past for ATLAS and planned routine tests for ATLAS Upgrade, and finally there are described our own tests of prototype the strip silicon detectors in FZÚ AV ČR supervised by Ing. Marcela Mikeščíková, Ph.D.

Keywords: *silicon detectors, ATLAS experiment, ATLAS Upgrade experiment, test of detectors*

Názov práce: *Testování křemíkových detektorů pro modernizaci detektoru ATLAS*

Autor: *Lucia Mészárosová*

Katedra / Ústav: *Ústav částicové a jaderné fyziky MFF UK*

Vedúci bakalárskej práce: *doc. RNDr. Zdeněk Doležal, Dr., ÚČJF MFF UK*

Abstrakt: Cieľom bakalárskej práce je popísať pripravovaný experiment ATLAS Upgrade a porovnať ho s pôvodným ATLASom, popísať pripravované rutinné testovanie detektorov a vlastné testovanie prototypov stripových kremíkových detektorov pre ATLAS Upgrade. Práca je rozdelená do troch kapitol. Prvá kapitola je venovaná obecné výskumnému zariadeniu CERN, konkrétne súčasnému detektoru ATLAS, jeho vnútornému detektoru a stripovým kremíkovým polovodičovým detektorom. V ďalšej časti sa charakterizuje plánovaný detektor ATLAS Upgrade a opäť jeho vnútorný detektor a stripové detektory. V závere tejto časti sa nachádza prehľadné porovnanie ATLASa a ATLASa Upgrade. Posledná kapitola sa zaoberá testovaním detektorov, najskôr rutinnému testovaniu detektorov v minulosti a plánovanému rutinnému testovaniu, nakoniec sú popísané samotné naše merania na FZÚ AV ČR prototypov stripových kremíkových detektorov pre ATLAS Upgrade pod vedením Ing. Marcely Mikeščíkovej, Ph.D.

Kľúčové slová: *kremíkové detektory, experiment ATLAS, experiment ATLAS Upgrade, testovanie detektorov*

Obsah

Úvod.....	1
1. CERN a ATLAS	2
1.1 CERN	2
1.2 ATLAS	3
1.3 Princíp kremíkových detektorov	5
1.3.1 Polovodiče.....	5
1.3.2 Pohyb nosičov náboja	6
1.3.3 Vznik voľných nosičov náboja	6
1.3.4 PN prechod.....	7
1.3.5 Polovodičové detektory.....	8
1.4 Stripové detektory	9
1.4.1 Vplyv žiarenia na kremíkové detektory	11
2. ATLAS UPGRADE	12
2.1 ITK - vnútorný detektor	12
2.2 Stripové detektory v ITK.....	13
2.3 Porovnanie ATLASa a ATLASa UPGRADE.....	16
3. Testovanie detektorov	19
3.1 Testovanie detektorov pre ATLAS	19
3.2 Testovanie detektorov pre ATLAS Upgrade.....	21
3.3 Testovanie detektorov na FZÚ AV ČR.....	22
3.3.1 Detektory ATLAS12.....	23
3.3.2 Popis testov	24
3.3.3 Samotné testovanie a vyhodnotenie výsledkov.....	25
Záver	31

Referencie	33
Zoznam použitých skratiek	34
Príloha	35
1. Porovnanie vlastností ATLASa a ATLASa Upgrade (anglicky).....	35

Úvod

Vo švajčiarskom CERNe už niekoľko rokov funguje LHC, ktorý sa pripravuje na vylepšenie, hlavne na zvýšenie luminozity (*High Luminosity LHC*). Na takéto prostredie častíc sa budú musieť pripraviť aj detektory, ktoré detekujú na LHC.

Jedným z nich je detektor ATLAS. Na jeho vylepšení sa už intenzívne pracuje, vyrábajú sa prototypy na jeho súčasti a testujú sa ich vlastnosti. Mal by začať pracovať v roku 2024 a ponesie nový názov ATLAS Upgrade.

Takisto sa predbežne pripravujú požiadavky na rutinné testovania detektorov podobné tým, ktoré prebehli na ÚČJF MFF UK pred niekoľkými rokmi.

Cieľom tejto práce je popísať vnútorný detektor ATLAS Upgrade, z akých častí sa bude skladať, čo je nové a čo naopak bude vynechané. Bližšie z vnútorného detektoru sa budeme venovať stripovým detektorom. Na záver urobíme prehľad vlastností a zmien ATLASa a ATLASa Upgrade.

Ako ďalšie zhrnieme postup spomínaného testovania detektorov v minulosti na ÚČJF MFF UK a porovnáme s pripravovaným testovaním.

Nakoniec budeme prezentovať testovanie detektorov, na ktorom sme sa podieľali v spolupráci s Ing. Marcelou Mikeščíkovou, Ph.D. Konkrétne to boli prototypy stripových detektorov pre ATLAS Upgrade. V práci popíšeme samotné testovanie detektorov a vyhodnotíme výsledky.

Text celej práce je rozdelený do troch kapitol. Prvá sa venuje súčasnému ATLASu a princípu polovodičových detektorov. Druhá kapitola popisuje pripravovaný ATLAS Upgrade a porovnáva ATLAS a ATLAS Upgrade. Posledná kapitola je venovaná testovaniu detektorov: rutinnému testovaniu detektorov a testovaniu prototypov detektorov na FZÚ AV ČR.

1. CERN a ATLAS

1.1 CERN

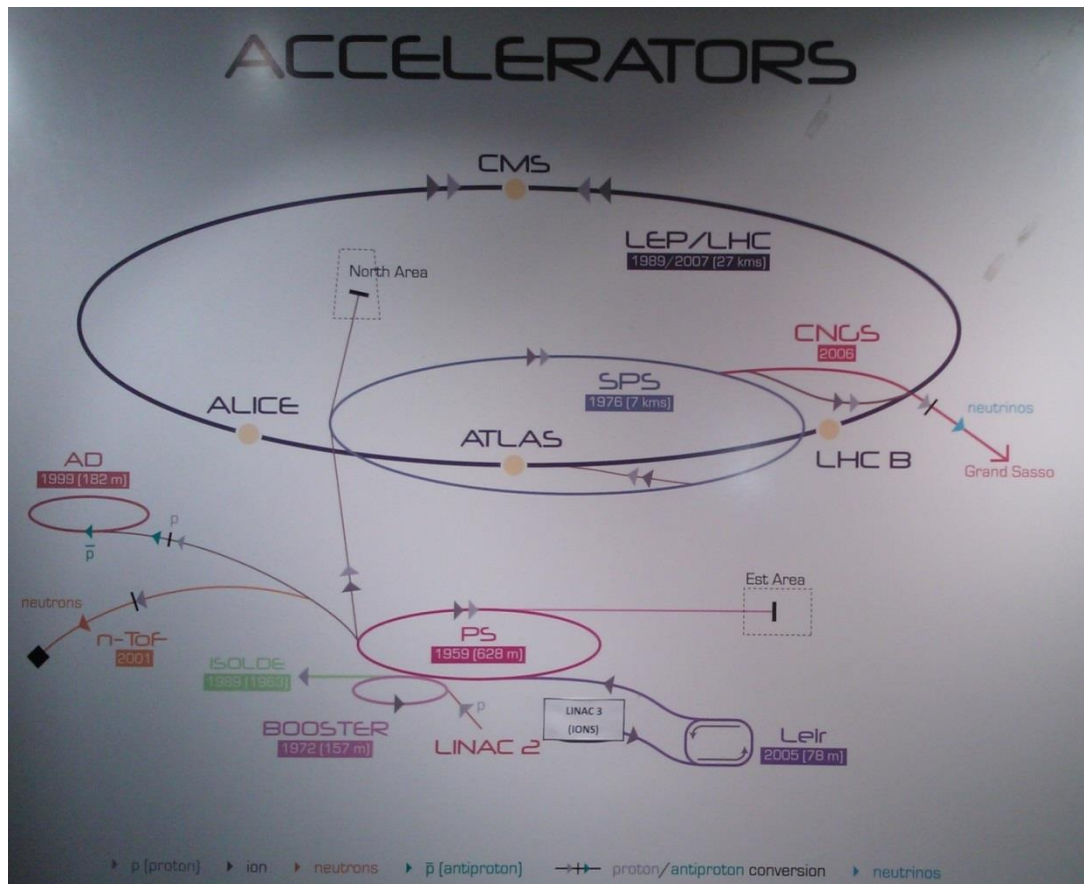
CERN je podľa [1] skratka pre "*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*", v preklade Európska organizácia pre jadrový výskum alebo Európske laboratórium časticovej fyziky. Je to zariadenie pre výskum fyziky elementárnych častíc. Nachádza sa na švajčiarsko-francúzskych hraniciach severozápadne od mesta Ženeva. Táto medzinárodná organizácia bola založená v roku 1954, v súčasnosti má 21 členov. V roku 1992 sa stalo členom aj Československo, od roku 1993 ako dva samostatné štáty. Na výskume sa podieľa množstvo ľudí aj z nečlenských štátov. V súčasnosti sa výskum zaoberá štúdiom fundamentálnych zložiek hmoty a silami pôsobiacimi medzi nimi.

CERN je známy aj ako miesto vzniku siete World Wide Web, ktorá pôvodne slúžila ako prostriedok na komunikáciu medzi vedcami. V CERNe boli objavené bozóny W^+ , W^- a Z , vytvorené prvé antiatómy. Posledný úspech bolo objavenie Higgsovho bozónu, za ktorý v roku 2013 dostali François Englert a Peter Higgs Nobelovu cenu.

Prebieha tu veľké množstvo experimentov, najznámejšie sú na urýchľovači LHC (*Large Hadron Collider*, v preklade Veľký hadrónový urýchľovač). Bol postavený v tuneli prechádzajúceho urýchľovača LEP (*Large Electron-positron Collider*, v preklade Veľký elektrón-pozitrónový urýchľovač) a začal pracovať v roku 2008. Tunel má kruhový tvar a dĺžku 27 kilometrov a je zložený z veľkého počtu supravodivých magnetov a urýchľujúcich štruktúr.

LHC dokáže časticu urýchliť až na 4 TeV, v budúcnosti sa plánujú aj vyššie energie, do 7 TeV. Protóny na zrážanie sa získavajú z fľaše plynného vodíka. Elektrickým poľom sa od atómov vodíka oddelia elektróny a zostanú želané protóny. Častice sa urýchľujú postupne. Najskôr sa urýchlia v Linac-u 2 na energiu až 50 MeV, potom v PSB (*Proton Synchrotron Booster*) na 1,4 GeV, potom v PS (*Proton Synchrotron*) na 25 GeV. Protóny sú ďalej poslané do SPS (*Super Proton Synchrotron*) a urýchlené na 450 GeV a nakoniec do LHC, ktorý má dve

trubice s vákuom: v jednej zväzok obieha v protismere hodinových ručičiek, v druhom v smere hodinových ručičiek. Celkovo trvá 20 minút, kým sa protóny urýchlia na 4 TeV. Zrážky sa pozorujú v 4 detektoroch: ALICE, ATLAS, CMS a LHCb. Schéma je uvedená na obr. 1.1.

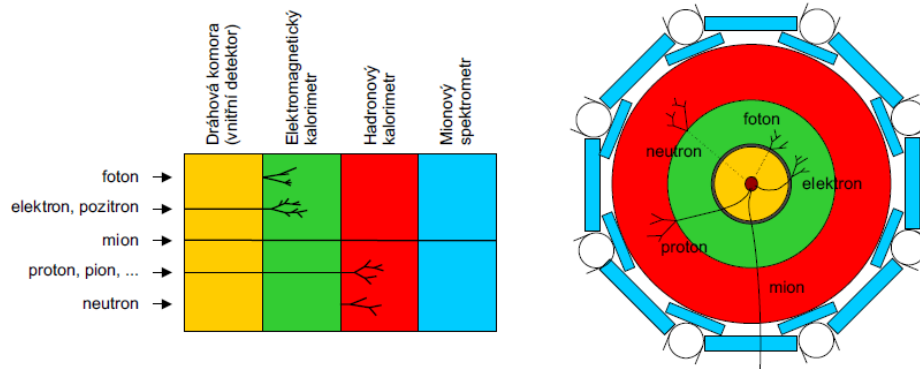


Obr. 1.1. Schéma urýchľovania protónov v LHC a ďalších experimentov v CERNe; fotka z vlastného archívu

1.2 ATLAS

Bližšie sa budeme zaoberať detektorom ATLAS, ktorý je predmetom tejto práce. Detektor má podľa [2] valcový tvar, je dlhý 44 m a vysoký 22 m. Tento zložitý systém nám dovoľuje merať priebeh dráhy a energiu vzniknutých častíc pri zrážke dvoch protónov. ATLAS je zostavený z detektorov rôznych typov, každý subsystem nám poskytuje trochu inú informáciu o častici. Na obr. 1.2 vidíme schému

vrstiev subdetektorov: vnútorný detektor, elektromagnetický kalorimeter, hadrónový kalorimeter a miónový spektrometer.



Obr. 1.2. Schéma vrstiev detektoru ATLAS; prevzaté z [2]

Vnútorný detektor, označuje sa aj ID (*Inner Detector*), sa nachádza najbližšie k miestu zrážky a vzniku veľkého množstva častíc. Skladá sa z 3 častí: kremíkové pixelové detektory, kremíkové stripové detektory a detektory prechodového žiarenia (*Transition Radiation Tracker*, skratka TRT). Kremíkové stripové detektory sa označujú skratkou SCT (*Semiconductor tracker* = polovodičový dráhový detektor), ktorých hlavná úloha je presné určenie dráhy nabitých častíc. Každá časť sa skladá z niekoľko súosých valcov (*barrel*) umiestnených okolo trubice urýchľovača. Valce sú na oboch stranách uzavreté diskami (*end-cap*). Toto je typické usporiadanie aj pre ostatné subdetektory ATLASa.

Pixelové detektory sú tvorené malými doštičkami kremíku rozdelenými na malé obdĺžniky s rozmermi 50x300 μm . Stripové detektory sú dlhé kremíkové prúžky vzdialené od seba 80 μm . Častica, ktorá prejde kremíkovou vrstvou, v nej vytvorí elektrický signál. Podľa toho, v ktorom pixeli alebo stripe signál vznikol, vieme zrekonštruovať dráhu častice. Detektor prechodového žiarenia je sústava kovových trubičiek s priemerom 4 mm obklopených materiálom, ktoré vyvoláva prechodové žiarenie.

Kalorimeter je detektor, v ktorom sa pohltí energia prelietavajúcej častice. V ATLASe sú dva kalorimetre: elektromagnetický, v ktorom sa pohltia ľahké častice

(elektrón, fotón), a hadrónový, v ktorom sa pohltia ťažké častice (napr. protóny, neutróny). Miónový spektrometer má za úlohu premerať energiu a znamienko náboja miónov omnoho presnejšie než vnútorný detektor.

1.3 Princíp kremíkových detektorov

Skôr ako začneme hovoriť o stripových detektoroch, popíšeme ich princíp. Najskôr opíšeme vo všeobecnosti polovodiče, PN prechod, interakcie častíc s materiálom a potom samotný princíp polovodičových kremíkových detektorov. Fakty použité v nasledujúcich statiach sú z [2].

1.3.1 Polovodiče

Polovodiče sú látky zo IV.A skupiny z periodickej sústavy prvkov, majú 4 valenčné elektróny. Ich typické vlastnosti vyplývajú z pásovej štruktúry, ktorá vyzerá tak, že takmer zaplnený valenčný pás je oddelený od vodivostného ako u izolantov, len vzdialenosť je menšia, čiže sa dá ľahšie prekonať. Pri prechode elektrónu z valenčného do vodivostného pásu vzniká vo valenčnom páse voľné miesto (diera), do ktorej môže preskočiť iný valenčný elektrón, čím sa diera pohybuje. Hlavným a technologicky najdôležitejším predstaviteľom je kremík.

Polovodiče delíme na vlastné a nevlastné (prímesové). Vlastné polovodiče obsahujú len svoje atómy, bez prímiesí. V praxi sa používajú veľmi málo, pretože je ťažké dosiahnuť potrebnú čistotu. Preto sa používajú nevlastné polovodiče, do ktorých sa zámerne dodáva isté množstvo atómov iného prvku. Ak atómy prímesového prvku obsahujú prebytok elektrónov (donory), hovoríme o polovodiči typu n , a ak obsahujú nedostatok (akceptory), hovoríme o polovodiči typu p . Ak je dopovanie prímiesami veľké, označujeme ich n^+ a p^+ . Ak je podiel donorových a akceptorových prímiesí približne rovnaký, hovoríme o kompenzovanom polovodiči.

1.3.2 Pohyb nosičov náboja

Vonkajšie elektrické pole spôsobí usmernenie pohybu elektrónov a dier a takisto ich urýchli v závislosti na veľkosti poľa. Tento pohyb sa nazýva drift.

Difúzia nastáva, ak je rozloženie náboja v materiáli nerovnomerné, dochádza k premiestňovaniu náboja z miest s vyššou koncentráciou do miest s nižšou.

V magnetickom poli na pohybujúcu sa časticu pôsobí Lorentzova sila, ktorá časticu odchýli od pôvodného smeru. Tým sa zmenší prúd, ktorý tiekol polovodičom pred priložením magnetického poľa a objaví sa elektrické pole kolmé na smer pohybu častíc. Tento jav sa nazýva Hallov jav.

1.3.3 Vznik voľných nosičov náboja

Už sme spomenuli, že voľné nosiče v polovodiči vznikajú tak, že elektrón je vyzdvihnutý do vodivostného pásu a na jeho pôvodnom mieste vznikne diera. Na uskutočnenie elektrón potrebuje energiu, stredná hodnota energie na vznik jedného elektrón-dierového páru v kremíku je 3,63 eV. Túto energiu môže získať napríklad z tepelného pohybu, z γ kvanta alebo interakciou ionizujúcej častice.

Ak elektrón prijme energiu z tepelného pohybu, excitácia sa nazýva tepelná. Prebieha už pri izbovej teplote. Tieto excitácie spôsobujú šum, preto sa pri konštrukcii vyberajú polovodiče so širokým zakázaným pásom alebo ich treba chladiť. Kremíkové detektory majú dostatočne nízky šum už pri izbovej teplote.

Ak elektrón prijme energiu z fotónu, hovoríme o optickej excitácii. Pri tomto deji vzniká jeden elektrón-dierový pár, pretože energia viditeľného svetla je porovnateľná so šírkou zakázaného pásu.

Pri prechode ionizujúcej častice vzniká veľké množstvo elektrón-dierových párov po celej dĺžke dráhy. Ich počet závisí na energii častice, ktorú stráca prechodom cez materiál.

Ťažká nabitá častica (napr. α častica) po prechode materiálom najskôr stráca svoju energiu rozptylom na malé uhly na atómových jadrách. Keď energia je dostatočne malá, začne excitovať a ionizovať atómy materiálu. Závislosť stredných ionizačných strát popisuje Bethe-Blochova formula.

Lahká nabitá častica (napr. elektrón) stráca energiu ionizáciou, excitáciou, rozptylom, no podstatnú časť energie stráca brzdným žiarením. Na rozdiel od α častíc sa elektróny pravdepodobnejšie rozptyľujú na veľké uhly, keďže sa rozptyľujú na rovnako ťažkých časticiach. Takisto elektróny prenikajú hlbšie do polovodiča.

Vysoko energetické nabité častice preletia detektorom takmer s nezmenenou rýchlosťou. Hustota vytvorených voľných nositeľov náboja je konštantná pozdĺž celej ich dráhy.

1.3.4 PN prechod

PN prechod je spojenie dvoch polovodičov typu p a n . Do elektrického obvodu vieme PN prechod zapojiť v priepustnom a v závernom smere, elektrický prúd prepúšťa iba v priepustnom smere.

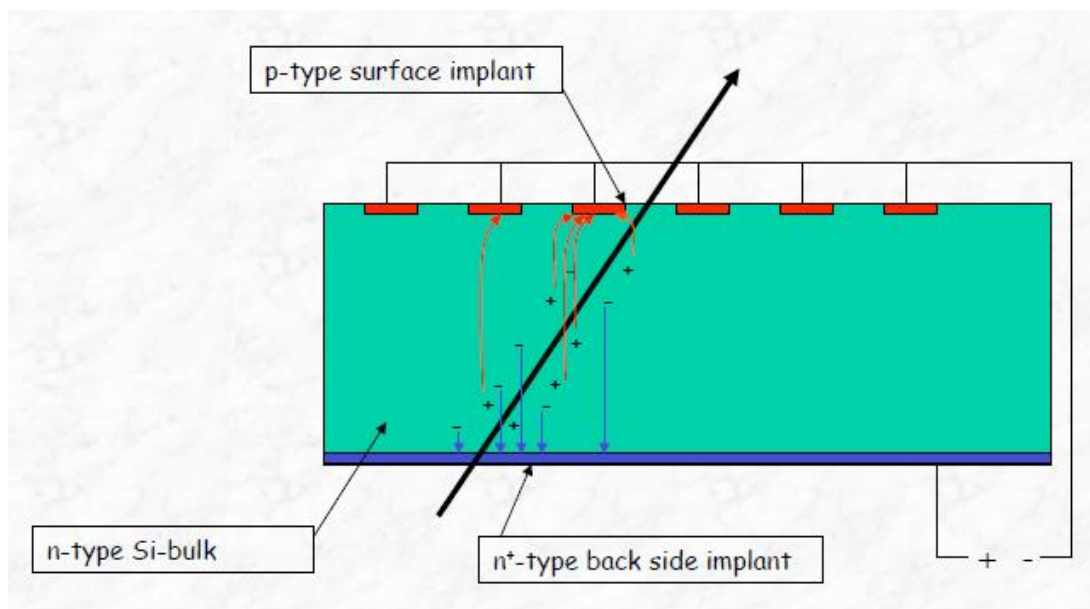
V oblasti prechodu elektróny difundujú z p do n oblasti, diery naopak z n do p . V tejto oblasti okolo prechodu sa nenachádzajú skoro žiadne nosiče náboja, čo má za následok vznik potenciálu V_i . Táto oblasť sa nazýva vyprázdnená oblasť. Pre detekciu je dôležité, aby bola čo najväčšia, preto sa na jej zväčšenie používa externé napätie V_{ext} v závernom smere. Aj v plne vyprázdnenom priestore vznikajú elektrón-dierové páry, ktoré majú za následok vznik tzv. spätného prúdu. Jednou z príčin tohto vzniku sú už spomínané tepelné excitácie.

1.3.5 Polovodičové detektory

Základom polovodičových detektorov sú vyprázdnené PN prechody. Prechod tvorí kombinácia veľmi čistého polovodiča typu n a tenkej vrstvy vysoko dotovaného polovodiča p^+ . Väčšinou sa druhá strana pokrýva polovodičom typu n^+ .

Vo všeobecnosti polovodičové detektory nám umožňujú získať dobré priestorové rozloženie. Najvýhodnejšie je detektor rozdeliť na menšie plošky o rozmeroch 10-100 μm , používajú sa malé obdĺžniky (pixely) a pružky (stripy).

Schéma kremíkového detektoru je na obr. 1.3. Detektor je tvorený vyprázdneným PN prechodom. Jedna časť je rozdelená na menšie časti, či už spomínané pixely alebo stripy, aby sme získali bližšiu informáciu o polohe prelietavajúcej častice. Po prechode nabitých častice sa vytvárajú elektrón-dierové páry, ktoré pod vplyvom elektrického poľa drifujú k pólom, elektróny ku kladne nabitým a diery ku záporne nabitým častiam, čo vytvorí signál v p časti [3].

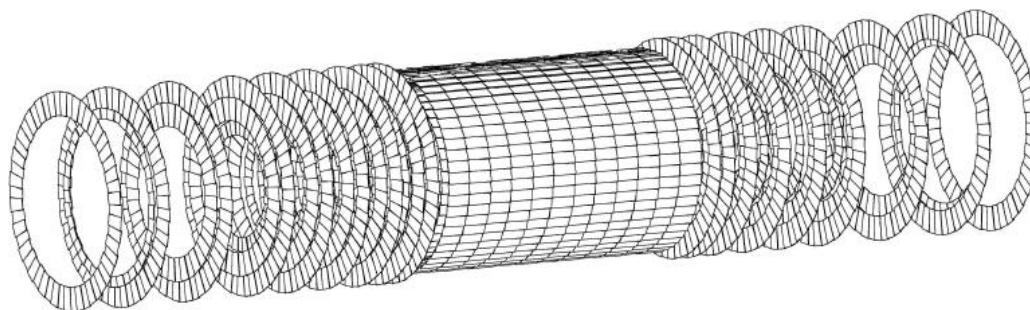


Obr. 1.3 Schéma detekcie v kremíkovom detektore, prevzaté z [3]

1.4 Stripové detektory

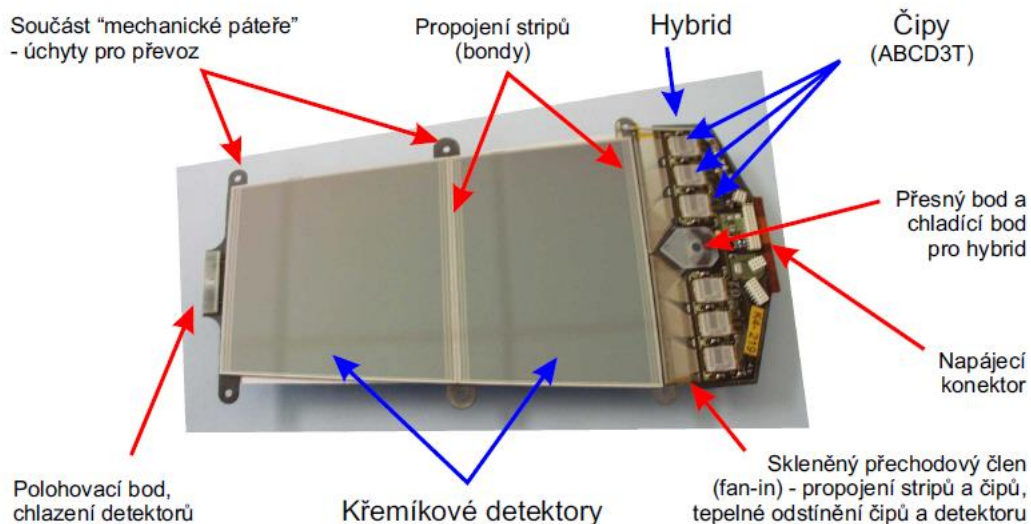
V ATLASe sa nachádzajú pixelové aj stripové kremíkové detektory. My sa budeme zaoberať stripovými.

SCT je rozdelený na 2 časti: valcovú a diskovú. Každá časť je zostavená z menších častí, modulov. Ich umiestnenie je zobrazené na obr. 1.4. Celkovo bolo použitých 5 typov modulov, jeden pre valcovú a štyri pre diskovú časť.



Obr.1.4. Umiestnenie modulov v rámci SCT, prevzaté z [2]

Každý modul sa skladá z jednostranných kremíkových stripových detektorov, príslušnej elektroniky a ďalších mechanických súčastí nutných k chladeniu a upevneniu modulu. Modul (konkrétne diskový, ktorý má lichobežníkový tvar) aj s jeho časťami je zobrazený na obr. 1.5.



Obr. 1.5. Rozložení diskového (end-cap) modulu, převzaté z [2]

Na každom module sú dva alebo štyri kremíkové detektory s rozmermi asi $6 \times 6 \text{ cm}^2$. U modulov so 4 detektormi sú stripy dvoch detektorov spojené tenkými drôtikmi (bondami), aby sa dosiahlo efektívnej dĺžky stripov 12 cm. Toto bolo nutné uskutočniť kvôli technologickým problémom vyrobiť dostatočne veľkú doštičku z dostatočne čistého kremíku. Na každom detektore je 768 aktívnych stripov.

V ATLASe sú použité obojstranné moduly so stripmi, kde sú detektory pripevnené k sebe stranami bez stripov a sú pootočené o uhol 40 mrad , čo umožňuje merať aj pozdĺžnu, resp. radiálnu súradnicu. Stripy vo valcovej časti sú navzájom rovnobežné a na jednej strane modulu majú smer osy valca. Stripy v diskovej časti sú rozbiehavé a v rámci SCT majú stripy na jednej strane radiálny smer.

Vyčítanie signálu zo stripov zaisťujú špeciálne čipy umiestnený na moduloch, ktoré umožňujú kalibráciu, jemné doladenie prahu pre každý strip či uchovávanie nameraných hodnôt po dobu $3 \mu\text{s}$. Vyčítanie z modulov je binárne, čo znamená, že ak je zozbieraný náboj väčší než je nastavená prahová hodnota (typicky 1-5 fC), je do registru zapísaná jednotka, opačne nula. Informácia o amplitúde sa nezachováva kvôli objemu dát, ktoré by nebolo možné spracovať.

1.4.1 Vplyv žiarenia na kremíkové detektory

Keďže kremíkové detektory sú vystavené takmer neustálej a silnej radiácii, popíšeme, aké zmeny to v nich môže spôsobiť. Podľa [4] môže nastať ionizácia alebo neionizujúce straty, ktoré sú deštruktívne a označujú sa NIEL (*Non-Ionizing Energy Loss*).

Pri neionizujúcich stratách môže dôjsť k dislokácii mriežkových atómov, k jadrovej interakcii, či k druhotným procesom od dislokovaných atómov. Tieto defekty nie sú stabilné, dislokované atómy sa môžu premiestňovať, rekombinovať.

Minimálna energia potrebná na uskutočnenie dislokácie závisí na energii a type žiarenia. Miera poškodenia sa vyjadruje pomocou účinného prierezu dislokácie v MeV mb. Ďalšou jednotkou je NIEL, ktorý sa vyjadruje v keV cm²/g. Medzi týmito jednotkami existuje prevod, pre kremík je to 100 MeV mb = 2,14 keV cm²/g. NIEL sa takisto používa na porovnanie jednotlivých druhov žiarenia ako prepočet jednotkovej straty, ktoré sú stanovené na straty pre 1 MeV neutróny.

To hlavné, čo nás zaujíma pri ožiarenom detektore, sú zmeny detekčných vlastností detektoru. Môže sa zvýšiť spätný prúd, zmenšiť hustota náboja, zvýšiť napätie vyprázdnenia detektora či sa v ňom zachytiť náboj. Zvýšenie spätného prúdu má za následok zvýšenie šumu, čo ovplyvňuje detekciu, môžeme namerať signál aj tam, kde častica nepreletela. Záchyt náboja spôsobí úbytok zozbieraného náboja, náboj sa nemusí detekovať kvôli nastavenému prahu.

2. ATLAS UPGRADE

V súčasnosti sa podľa [5] pripravuje vylepšenie detektoru ATLAS na ATLAS Upgrade, ktorý by mal začať prevádzku okolo roku 2024. Detektor bude musieť zvládnuť a využiť možnosti vysokej luminozity¹, na ktorej bude bežať HL-LHC (*High Luminosity LHC*). Vysoká luminozita prinesie ďalšiu oblasť v hľadaní novej fyziky a takisto sa rozšíria možnosti štúdia vlastností Higgsovho bozónu.

HL-LHC začne zrážať okolo roku 2024 a začne na luminozite $5.10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a v priebehu 10 rokov sa plánuje zvýšiť o tzv. integrovanú luminozitu² 2500 fb⁻¹. Zrážať sa bude opäť protón s protónom.

2.1 ITK - vnútorný detektor

Modernizácia spočíva v kompletnom vylepšení a výmene detektora a vo výmene elektroniky ostatných častí. My sa budeme zaujímať o vnútorný detektor, ktorý dostane nový názov ITK (*Inner Tracking System* = vnútorný dráhový systém). Súčasný vnútorný detektor nie je vhodný na prevádzkovanie v prostredí vysokej radiácie, preto je nutné ho vymeniť za nový. Ten bude musieť zvládnuť merať v prostredí s veľkou multiplicitou zrážok (dôjde k zvýšeniu počtu zrážok protónov pri jednej interakcii z 23 na 200) a odolávať vyššej radiácii. V súčasnosti sa pripravujú technológie a vyrábajú sa prototypy detektorov.

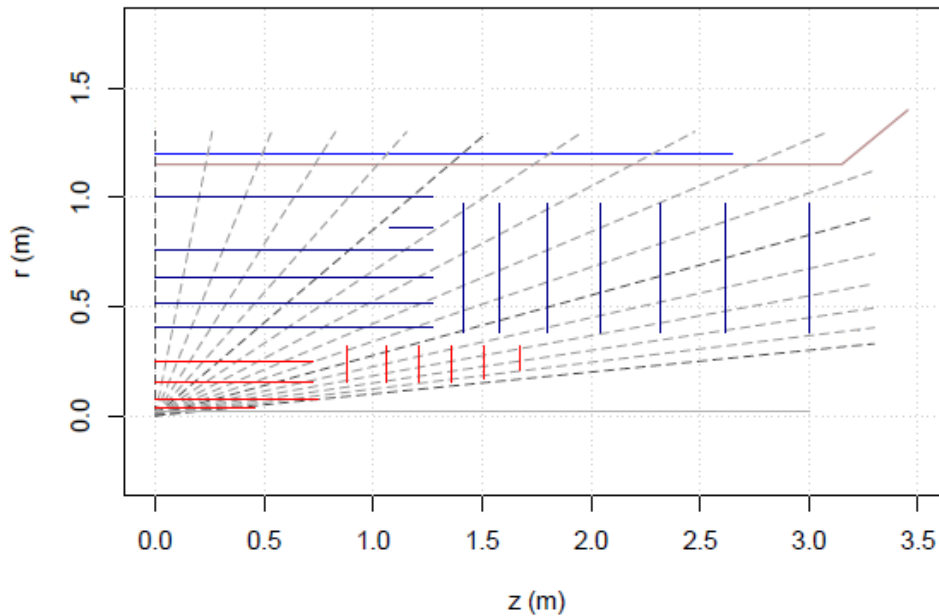
Najväčšia zmena bude použitie výhradne kremíkových pixelových a stripových detektorov, trubičky detektora prechodového žiarenia budú nahradené dlhými stripmi.

Plán rozmiestnenia jednotlivých vrstiev detektorov je zobrazený na obr. 2.1. V oblasti centra sú detektory usporiadané do valcov (*barrel*) – 4 vrstvy pixelových,

¹ Luminozita je fyzikálna veličina, ktorá popisuje počet častíc, ktoré preletia za jednotku času jednotkovou plochou v mieste zrážky.

² Integrovaná luminozita je veličina, ktorú získame integráciou luminozity podľa času.

3 vrstvy krátkych stripových a 2 vrstvy dlhých stripových detektorov. Vzdialenejšie oblasti budú usporiadané do diskov (*end-cap*) – 6 pixelových a 7 stripových. Tento plán usporiadania nie je fixný, existujú aj ďalšie alternatívne usporiadania s istými výhodami.



Obr.2.1. Usporiadanie kremíkových detektorov do valcov (vodorovné čiary) a diskov (zvislé čiary); modré čiary znázorňujú stripové a červené čiary pixelové detektory. Na pozícii (0,0) sa nachádza bod zrážky. Obrázok je prevzatý z [5]

2.2 Stripové detektory v ITK

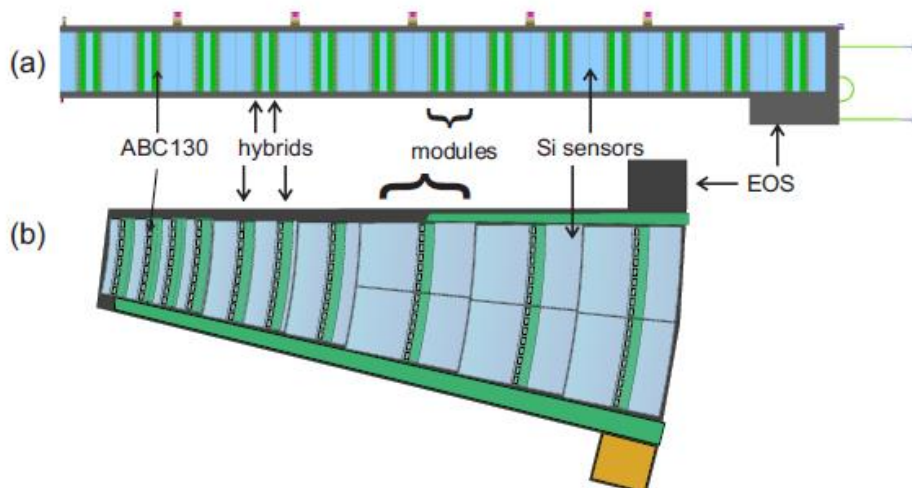
Ďalej sa budeme zaoberať opäť stripovými detektormi. Ako sme vyššie uviedli, zo stripov bude zložených 5 valcov (3 vrstvy krátkych a 2 vrstvy dlhých stripov) a 7 diskov. Medzi nimi bude umiestnený ešte jeden krátky „stúb“ (v preklade útržok) valec, ktorý pokrýva stratu prijímania medzi nimi.

Pri ATLASe Upgrade sa jednotlivé časti stripových detektorov budú skladať do väčších častí – lišty (*stave*) a lupene (*petal*). Tieto časti sa budú pripevňovať priamo na detektor. Jednotkami lišty a lupena sú moduly. Modul je tvorený jedným

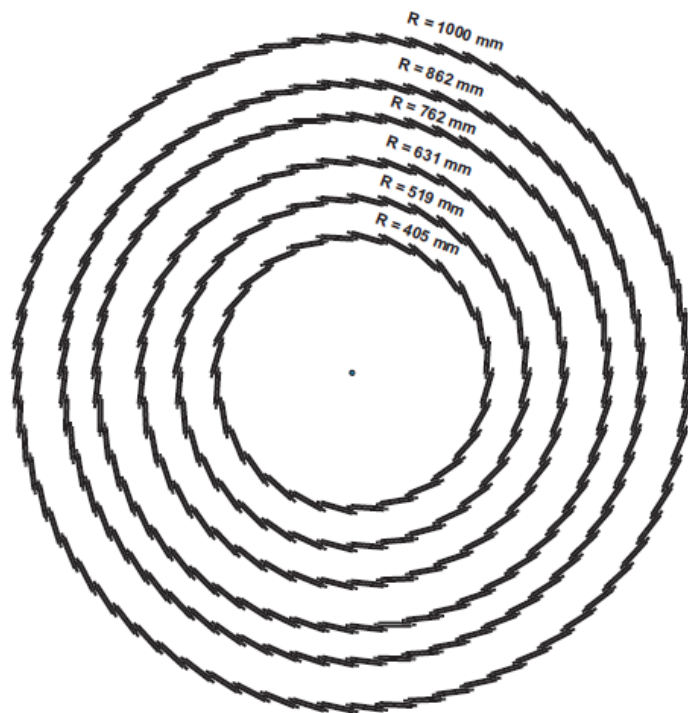
alebo dvoma hybridmi (aplikácia čipov do obvodu) a samotným kremíkovým detektorom.

Lišta je základná jednotka valca. Je tvorená ľahkým jadrom zaisťujúcim mechanickú pevnosť, oporou pre moduly a časťami, ktoré zaisťujú elektrickú, optickú a chladiaci funkciu. Ďalšie časti sú zobrazené na obr. 2.2a. Celý valec bude pokrývať oblasť $\pm 1,3$ m od bodu zrážky. Jednotlivé lišty sa budú skladať do kruhu, budú pootočené o 10° . Ich poloha a jednotlivé priemery valcov sú zobrazené na obr. 2.3.

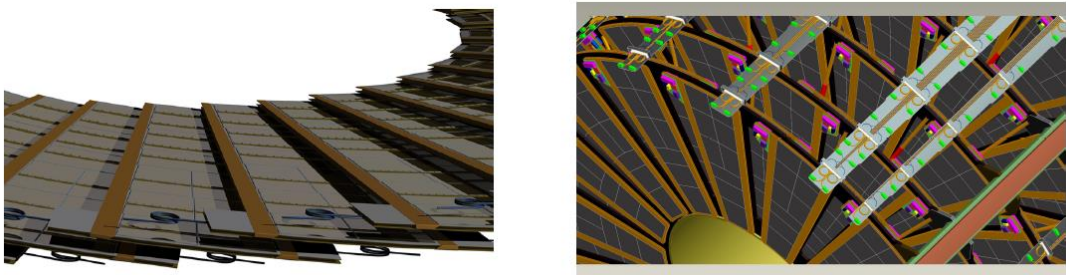
Sedem diskov na každej strane bude tvorený lupeniami. Každý disk bude zložený z 32 identických lupenňov, každý je zložený z deviatich modulov, organizovaných do šiestich kruhov. Vonkajšie 3 kruhy sú zložené po 2 moduloch a vnútorné 2 kruhy sú po jednom module. Ďalšie časti sú zobrazené na obr. 2.2b. Celá disková oblasť rozšíri dĺžku stripov na ± 3 m. Na prekrytie tak veľkej oblasti je potrebných 6 rôznych geometrií a 14 variácií hybridov. Čo sa týka usporiadania líšt do samotných diskov, rozhoduje sa medzi dvoma usporiadaniami: usporiadanie do vejára (*turbofan*) a hradové usporiadanie (*castellated layout*), ktoré má lupene umiestnené na oboch stranách disku. Ich schémy sú uvedené na obr. 2.4.



Obr. 2.2. Schéma lišty a lupenňa, prevzaté z [5]; nachádzajú sa na nich ABC130 (špeciálne čipy), hybridy, moduly, samotné kremíkové detektory a EOS (End of Stave) karta, ktorá zabezpečuje rozhranie



Obr. 2.3. Usporiadanie líšt (pootočených o 10°) do valca; prevzaté z [5]



Obr.2.4. Usporiadanie lupeňov v diskoch do vejára (naľavo) a do hradového usporiadania (napravo); prevzaté z [5]

Stripové detektory budú hrubé $(320 \pm 15) \mu\text{m}$. Veľkosť valcového detektoru je $97,54 \times 97,54 \text{ mm}^2$ a v jednom detektore bude 1280 stripov, čím dostávame vzdialenosť dvoch stripov $74,5 \mu\text{m}$.

Na lište sú stripy rovnobežné so stranami detektora. Existujú 2 variácie stripov: krátke stripy, ktoré budú použité v 3 vnútorných valcoch a budú mať dĺžku $23,820 \text{ mm}$, a dlhé stripy v 2 vonkajších s dĺžkou $47,755 \text{ mm}$.

Pre lupene budú stripy umiestnené radiálne (smerujúce do zväzku) kvôli meraniu $r\phi$ súradnice. Ako výsledok majú klinový tvar. Pootočené 40 mrad medzi stripmi dosiahneme rotáciou stripov priamo na detektore o 20 mrad.

2.3 Porovnanie ATLASa a ATLASa UPGRADE

Na koniec kapitoly pridáme prehľadné zhrnutie nami popisovaných vlastností a porovnanie s pôvodným ATLASom.

Na skúmanie napríklad vlastností Higgsovho bozónu je potrebné mať omnoho viac častíc urýchlených na vysoké energie. To znamená, že hlavná zmena bude v luminozite. V súčasnosti LHC dosiahol energiu 4 TeV (budúci rok sa plánuje dosiahnuť energia 7 TeV) pre jednu časticu pri luminozite $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. HL-LHC plánuje urýchliť častice pri luminozite desaťkrát vyššej.

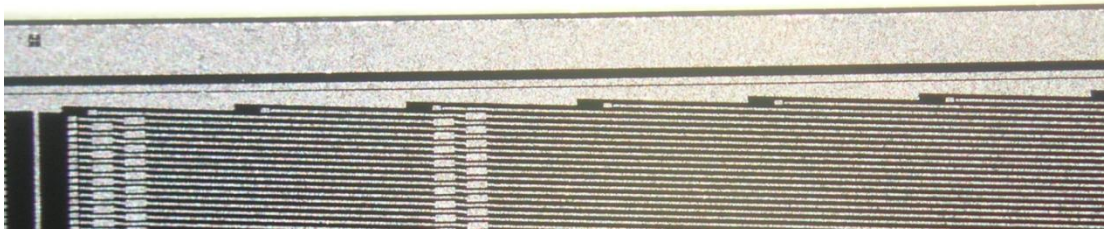
Od energii častíc sa odvíja aj konštrukcia detektora. ATLAS Upgrade by mal mať vylepšené všetky jeho časti, subdetektory. My sme sa zaoberali konkrétne vnútorným detektorom. Najväčšia zmena je použitie iba kremíkových pixelových a stripových detektorov. Detektor prechodového žiarenia (TRT) bude nahradený dlhými kremíkovými stripmi. Pixelový systém sa rozšíri do väčšieho polomeru a viac pixelov bude v prednej časti, čo vylepší meranie dráhy častice. Takisto sa zvýši vonkajší polomer, čo vylepší rozlíšenie hybnosti.

Vo vnútornom detektore sme sa bližšie zaoberali stripovými detektormi. Vlastnosti kremíkového detektora ostali takmer bez zmeny. Jediná výraznejšia je ich skrátenie na dve dĺžky: long a short. Tak ako v SCT a aj ITK sú moduly so stripovými detektormi obojstranné a vzájomne pootočené o 40 mrad, čo umožňuje merať aj pozdĺžnu, resp. radiálnu súradnicu. Pri ATLASe bol modul zostavený z dvoch stripových detektorov, ktoré boli voči sebe posunuté. U Upgrade by pootočenie stripov malo byť priamo zakomponované na kremíkovej doske na detektore, vid' obr. 2.5.

1. strana



2. strana



Obr.2.5. Zabudované pootočené stripov na detektore, rozdiel medzi 1. a 2. stranou (prototyp stripového detektoru); obrázok zhotovený v laboratóriu ÚČJF v Tróji

Prehľad popisovaných vlastností je uvedený v tab. 2.1. Údaje v nej použité sú prevzaté z [2] a [5]. Tabuľku sme preložili aj do angličtiny, táto tabuľka je uvedená v prílohe na konci práce.

	ATLAS		ATLAS Upgrade	
<i>Energia častíc</i>	4-7 TeV		7 TeV	
<i>Luminozita</i>	$\sim 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$		$\sim 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	
<i>Časti, ktoré sa skladajú do diskov a valcov</i>	barrel a end-cap modul		stave a petal zložené z niekoľkých modulov	
<i>Vrstvy vnútorného detektora</i>	Pixel:	1 valec (odstrániteľný)	Pixel:	4 valce
		2 valce		6 diskov
		4 disky		
	Strip:	4 valce	Strip:	3 valce (krátke)
		9 diskov		2 valce (dlhé)
	TRT:	valcová časť	Strip:	7 diskov
koncová časť				
<i>Plocha kremíka</i>	Pixel:	1,6 m ² valec	Pixel:	5,1 m ² valec
		0,7 m ² disk		3,1 m ² disk
	celkovo:	2,3 m ²	celkovo:	8,2 m ²
	Strip:	34,4 m ² valec	Strip:	122 m ² valec
		26,7 m ² disk		71 m ² disk
celkovo:	61,1 m ²	celkovo:	193 m ²	
<i>Počet kanálov [10⁶]</i>	Pixel:	97 valec	Pixel:	445 valec
		43 disk		193 disk
	Strip:	3,2 valec	Strip:	47 valec
		3,0 disk		27 disk
<i>Dĺžka stripov</i>	12 cm		Krátke: 23,820 mm Dlhé: 47,755 mm	
<i>Počet stripov (na každej strane)</i>	768		1280	
<i>Vzdialenosť 2 stripov</i>	80 μm		74,5 μm	
<i>Pootočenie stripov</i>	40 mrad		40 mrad	
<i>Rozsah valcov, súradnica r [mm]</i>	300 - 250		Pixel:	39 - 250
			Strip:	405-1000
<i>Rozsah diskov, súradnica z [mm]</i>	835 - 2788		Pixel:	877 - 1675
			Strip:	1400 - 3000

Tabuľka 2.1. Prehľad a porovnanie vlastností u ATLAS a ATLAS Upgrade, použité údaje sú z [2] a [5]

3. Testovanie detektorov

Konštrukcia každého dielu modulu podľa [2] prejde dlhým vývojom, keďže musí spĺňať veľmi náročné kritériá na kvalitu a životnosť. Už behom výroby sú všetky jednotlivé diely veľmi starostlivo testované na kvalitu. Po zložení súčiastok do modulu prejde celý modul ďalším množstvom testov.

Cieľom tejto kapitoly je popísať tieto testy a prostredia na testovanie.

3.1 Testovanie detektorov pre ATLAS

V rokoch 2004-2005 bolo v Prahe (ÚČJF bolo jedno z miest) otestovaných 400 modulov, ktoré boli vyrobené v Mníchove. Každý kompletne postavený modul musel prejsť jednotlivými, na seba nadväzujúcimi testami v nižšie uvedenom poradí. Týmto testom musel každý modul vyhovieť. Jednotlivé testy boli (podľa [2] a [6]):

1. Kontrola metrológie

Po zostavení modulu boli najskôr skontrolované jeho mechanické vlastnosti a presnosť umiestnenia jednotlivých prvkov.

2. Voltampérová charakteristika

V tomto kroku sa premerali závislosti spätného prúdu na priloženom vyprázdňovacom prúde (do 450 V). Merania prebiehali pri teplote 20°C alebo sa veľkosť prúdu prepočítala na túto teplotu pomocou vzťahu uvedenom v [6]. Zistené hodnoty sa potom porovnávajú s charakteristikami nameranými na samostatných detektoroch.

3. Teplotné cyklovanie

V tejto fáze každý modul prešiel desiatimi teplotnými cyklami. V každom cykle sa teplota najskôr zvyšovala z -30°C na +50°C a následne znižovala

na -30°C. Každá zmena trvala 30 minút (2-3°C na minútu). Pri tomto teste nebol na modul privádzaný žiadny prúd.

4. Metrologická kontrola

Po teplotnom cyklovaní nasledovalo prekontrolovanie geometrických parametrov modulu.

5. Voltampérova charakteristika

Zopakoval sa test v bode 2. Ten mal prekontrolovať, či po teplotnom cyklovaní nedošlo k zmenám elektrických vlastností modulu.

6. Základný test elektrickej funkčnosti (*Confirmation Sequence*)

Vykonalo sa niekoľko zo všetkých testov tak, aby boli rýchlo premerané základné charakteristiky modulu.

7. Test stability spätného prúdu

Po dobu 24 hodín bol modul pripojený na vyprázdňovacie napätie 150 V a bola napájaná jeho elektronika. Teplota musela byť (10 ± 5) °C a bola meraná termistorom. Ďalej muselo byť možné počas testovania kontrolovať relatívnu vlhkosť. Spätný prúd bol meraný každých 15 minút.

8. Test elektrickej stability

Tento test prebiehal súčasne s predchádzajúcim. Jeho cieľom bolo overiť funkčnosť modulu pri nízkej teplote a stabilitu jeho parametrov. Vždy za niekoľko hodín bola spustená tzv. *Confirmation Sequence* z bodu č.6. Tento test umožňoval sledovať časové rozloženie výskytu porúch na moduloch.

9. Elektrická charakteristika (*Characterisation Sequence*)

V záverečnom teste sa vykonalo meranie všetkých elektrických vlastností modulu, ktoré boli následne nahrané do databáze CERNa.

Pre elektrické testovanie modulov bolo nutné mať potrebné hardwarové a softwarové vybavenie. Takisto je nutné mať vhodné prostredie, na čo sa využíva čistá miestnosť. Takáto miestnosť sa nachádza aj v budove ťažkých laboratórií v Tróji.

Čistá miestnosť je miestnosť, do ktorej je privádzaný vzduch zbavený prachu, má kontrolovanú teplotu a vlhkosť. Pred vstupom je potrebné sa prezliecť do špeciálneho oblečenia.

Pri rutinnom testovaní modulov sa vykonali dve série testov: úplná (*characterisation sequence*), ktorá zahrňovala 10 častí, a skrátená (*confirmation sequence*), ktorá zahrňovala iba 4 z nich. Vybrané moduly boli podrobované ďalším špecifickým testom, v Prahe boli niektoré moduly testované pomocou beta žiariča a laseru.

3.2 Testovanie detektorov pre ATLAS Upgrade

V súčasnosti sa začína uvažovať nad tým, akým spôsobom sa budú testovať moduly, aké zmeny budú potrebné, či niektoré testy nebudú zbytočné alebo naopak netreba nejaké pridať. Keďže sú detektory pre Upgrade ešte len vo fáze prototypov, fakty uvedené v tejto časti sa môžu ešte zmeniť. Podľa [7] sú testy nasledovné:

- **Voltampérová charakteristika**

Bude vykonávaná pri 20°C, do 500 V.

- **Test stability spätného prúdu**

Budú vykonávané po dobu 24 hodín, pri 150 V a teplote -10°C. Maximálne zvýšenie prúdu pre dobrý modul je 4 μ A po 5 minútach.

- **Metrológia**

Bude sa rozdeľovať na kontrolu vbudovaného (*in-plane survey*), čo zahŕňa kontrolu otočenia hybridu, a na kontrolu primontovaných súčastí

(*out of plane survey*), čo zahŕňa kontrolu výšky lepenia a celkového posúdenia správnosti modulu.

- **Test šumu (*Pass/Fail*)**

Je to test efektivity stripov, kde 99% stripov musí byť funkčných s nízkym šumom s nastaveným prahom 1 fC.

- **Teplotné cyklovanie**

Bude prebiehať opäť v rozmedzí teplôt -30°C - $+50^{\circ}\text{C}$. Začne a skončí sa na izbovej teplote a najskôr sa zvýši teplota na $+50^{\circ}\text{C}$. Minimálna zmena bude $2-3^{\circ}\text{C}$ a každá zmena bude trvať 30 minút. Celkový čas tohto testu bude 20 hodín.

- **Test elektrickej stability**

Tento test bude prebiehať 24 hodín pri teplote -10°C pričom teplota a prúd budú monitorované. Každých pár hodín sa urobí *Confirmation Sequence* a na konci testu sa urobí *Characterisation Sequence*. Tieto testy boli opísané v 3.1.

Niektoré z testovaných modulov budú opäť podrobené špecifickým testom. Radiačné testy budú mať za úlohu pozorovať mechanické zmeny, zmeny šumu či spätného prúdu po vložení modulu do zväzku protónov s energiou $24\text{ GeV}/c$. Ďalší test zahŕňa vloženie modulu do okolia beta žiariča ^{106}Ru a preskenovanie modulu pomocou laseru. Posledný je test pomocou zväzku (*Beam Test*), ktorý sa bude robiť priamo v CERNe.

3.3 Testovanie detektorov na FZÚ AV ČR

Na Fyzikálnom ústave AV ČR sme mali možnosť podieľať sa na testovaní detektorov. Konkrétne sa jednalo o prototypy kremíkových stripových detektorov pre ATLAS Upgrade a merali sme ich IV a CV charakteristiky. IV rozumieme

voltampérovu charakteristiku (závislosť prúdu na priloženom napätí) a CV závislosť kapacity na priloženom napätí. V tejto časti popíšeme testované detektory, testy na nich vykonávané a vyhodnotíme namerané závislosti.

3.3.1 Detektory ATLAS12

Na testovanie sme mali k dispozícii prototypy detektorov s názvom ATLAS12. Podľa [8] na rozdiel od detektorov v LHC, kde sú stripy vyrobené z p kremíka a spodná časť z n , sa už takéto rozloženie nedá použiť v HL-LHC, pretože n typ zmutuje do p typu po dosiahnutí fluencii 10^{13} 1-MeV n_{eq}/cm^2 . Čiže stripy musia byť vyrobené z n . Navyše aj z finančných dôvodov sa rozhodlo vyrobiť detektory so stripmi p -typu a spodnou časťou n -typu.

Výroba týchto detektorov je potrebná na vývoj veľkej plochy detektora a na hlavne vývoj radiačne odolného detektora pre HL-LHC. Návrh detektorov aj s požiadavkami na vlastnosti (*pre-irradiation*) bol zadaný firme, ktorá ich vyrobila. Následne sa detektory ožarujú rôznymi časticami a vyhodnocujú sa ich vlastnosti (*post-irradiation*).

Detektory sú vyrábané na tzv. „wafers“ (v preklade obľátky) kruhového tvaru. Existujú 2 varianty: ATLAS12M a ATLAS12A. Pre LHC sa vyrábali wafery s priemerom 4 palce (10,2 cm), v súčasnosti popredné spoločnosti pre výrobu kremíkových stripových detektorov pokročili a používajú 6 palcové (15,2 cm).

Wafer sa skladá z jedného veľkého stripového detektora 10x10 cm a po stranách má umiestnené mini-detektory 1x1 cm, ktoré slúžia na ďalšie ožarovanie a testovanie. Typ ATLAS12M je zložený z rovnobežných stripov a ATLAS12A obsahuje radiálne stripy, ktoré pri mini-detektoroch sú v dvoch variantách: stripy bližšie k stredu (*small pitch*) a ďalej od stredu (*large pitch*). Veľký detektor obsahuje 1280 stripov, ktoré sú od seba vzdialené 74,5 μ m.

3.3.2 Popis testov

V [8] sa nachádzajú popisy všetkých testov, od najzákladnejších až po úplne špecifické testy, ktoré sa vykonávajú pred a po ožiarení detektorov. Niektoré informácie v charakteristikách testov sa môžu časom meniť (napr. kvôli optimalizácii), keďže tieto detektory sú stále v stave testovania a vyhodnocovania. V tejto časti popíšeme opíšeme nami vykonávané testy:

- **IV charakteristika po ožiarení**

Cieľom tohto testu je odmerať voltampérovú charakteristiku. Prúd musí byť meraný v chlade. Meria sa v krokoch po 20 V, v rozmedzí 0-600 V s 10 sekundovým oneskorením. Test sa ukončí po prekročení prúdu 1 mA. Počas testu sa má zaznamenávať teplota. Aby bol detektor dobrý, musí byť charakteristika pri -25°C pod hodnotou prúdu 1 mA pri napätí do 600 V.

- **CV charakteristika po ožiarení**

Cieľom tohto testu je určiť napätie vyprázdnenia (*depletion voltage*) detektoru. Meranie prebieha v chlade a pri daných technických požiadavkách. Opäť je jeden krok merania je 20 V, v rozmedzí 0-600 V s 10 sekundovým oneskorením. Dáta sa vynášajú ako závislosť $1/C^2$ [F^{-2}] na napätí. Z tejto závislosti sa určuje napätie vyprázdnenia detektora fitovaním priesečníka dvoch priamok: lineárnej a nasýtenej. Pre tento test nie sú žiadne požiadavky na detektor.

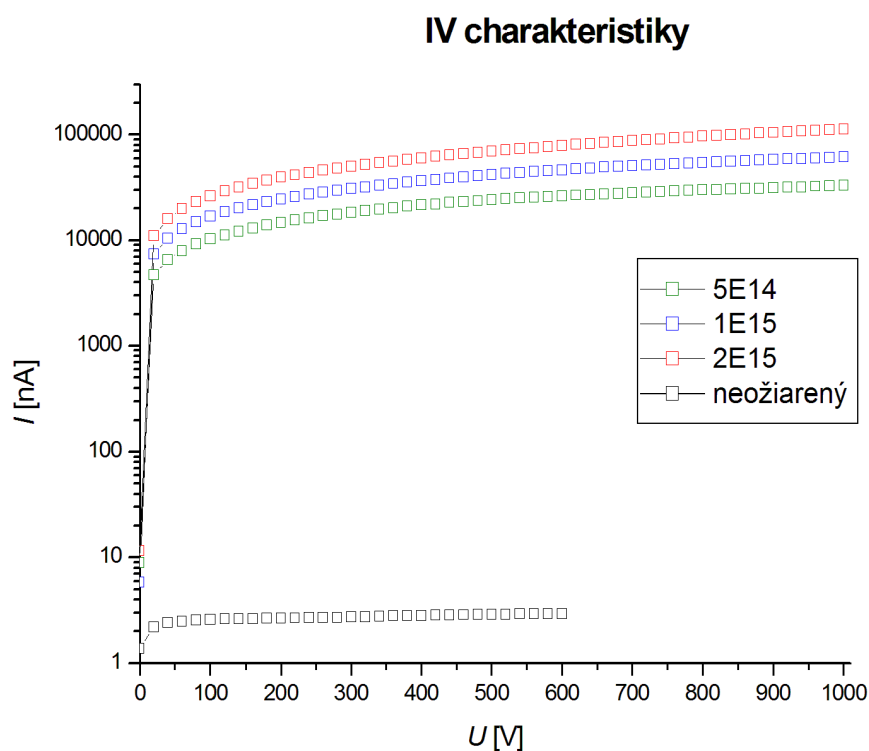
- **Zahriatie detektorov (*annealing*)**

Ožiarené detektory by mali podstúpiť kontrolované zahriatie počas 7 dní pri $+25^{\circ}\text{C}$ alebo počas 80 minút pri $+60^{\circ}\text{C}$, čím sa dosiahne minimálny rozsah napätia vyprázdnenia.

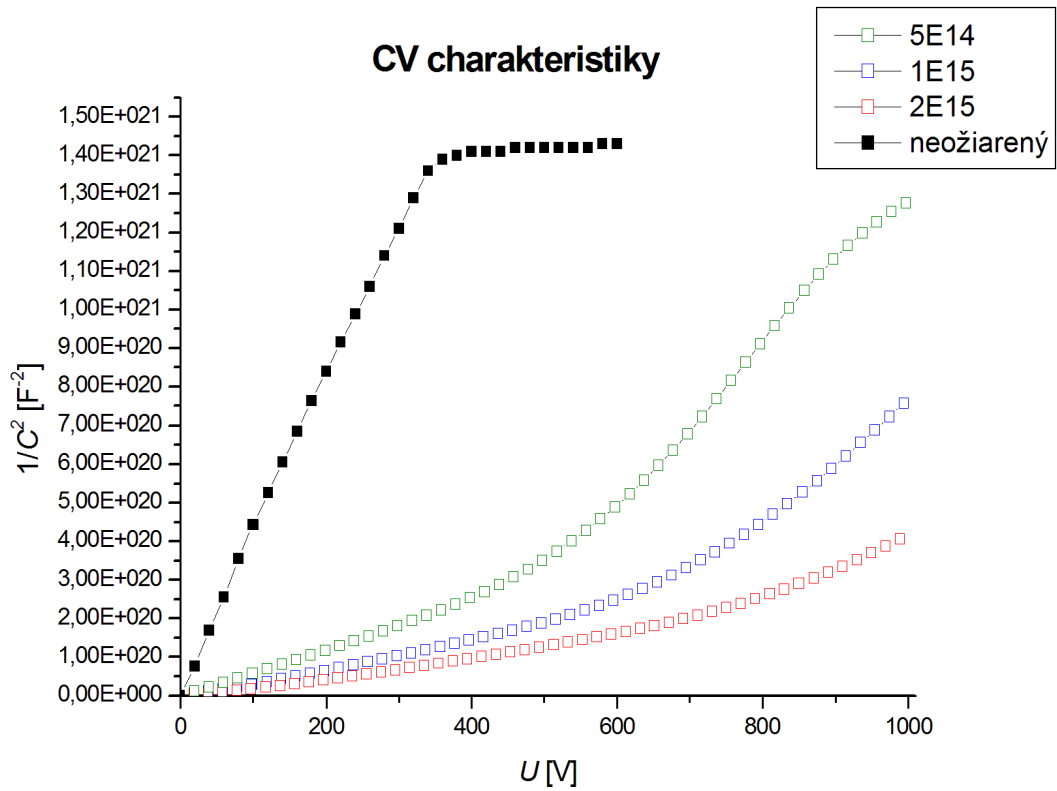
3.3.3 Samotné testovanie a vyhodnotenie výsledkov

Ako prvé sme mali k dispozícii mini-detektory ATLAS12A s rozmermi 1x1 cm, ktoré boli ožiarené protónmi rôznych dávok. Dávky sú označené jednotkami n_{eq}/cm^2 .

Odmerali sme ich IV a CV charakteristiky, ktoré sú uvedené v grafoch 3.1 a 3.2. Je vidieť, že prúd ožiarenými detektormi je vyšší o 3 rády než detektorom neožiareným, najväčší prúd tečie detektorom najviac ožiareným. Takisto sa zvýšilo napätie vyprázdnenia, čím väčšie ožiarenie, tým je vyššie. Neožiarený má napätie vyprázdnenia okolo 300 V a ožiarené ho majú až nad 1000 V, čo je za hranice nami meraného napätia.



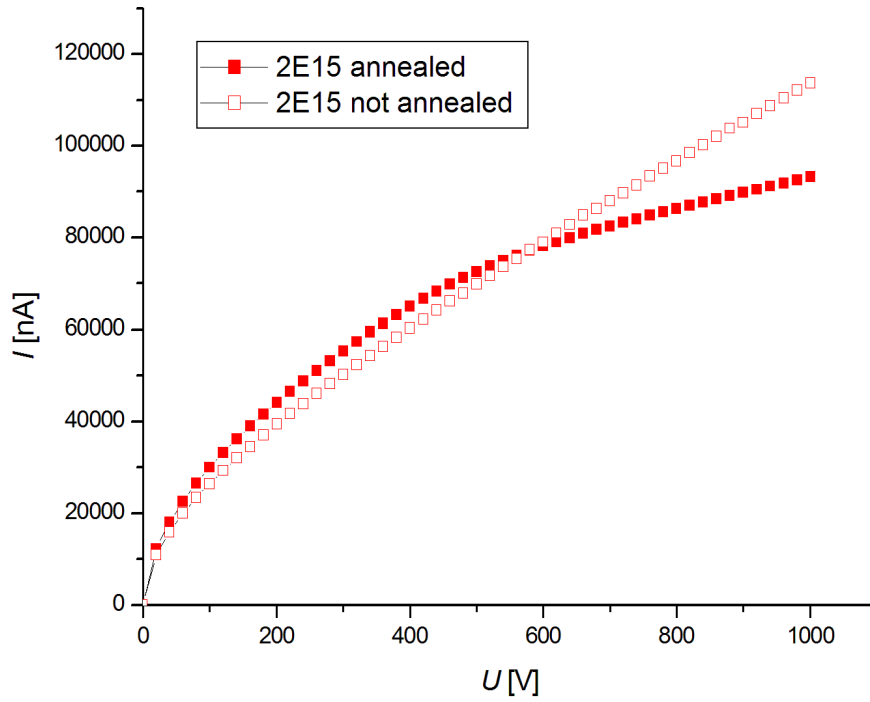
Graf 3.1. IV charakteristiky ožiarených detektorov protónmi, jednotky v legende sú uvádzané v n_{eq}/cm^2 ; pre porovnanie je v grafe uvedený aj neožiarený detektor, po ožiarení sa prúd 1000-krát zvýšil



Graf 3.2. CV charakteristiky ožiarených detektorov protónmi, jednotky v legende sú uvádzané v n_{eq}/cm^2 ; pre porovnanie je v grafe uvedený aj neožiarený detektor, po ožiarení sa podstatne zvýšilo napätie vyprázdnenia

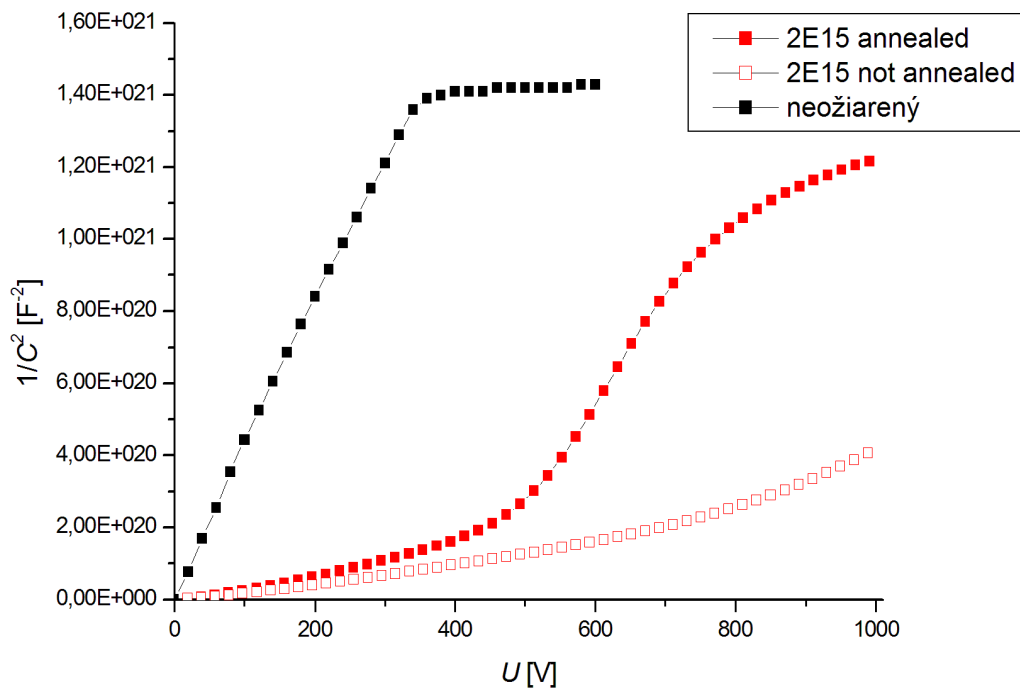
Následne sme detektory zahriali (*annealing*) po dobu 80 minút pri teplote $+60^\circ\text{C}$ a znovu sme odmerali ich IV a CV charakteristiky. Porovnanie charakteristík s nezahriatym detektorom je uvedené v grafoch 3.3 a 3.4. Je vidieť, že sa zahriatím zmenší napätie vyprázdnenia a aj prúd tečúci detektorom je o niečo menší, rádovo rovnaký.

Annealing - porovnanie IV charakteristík



Graf 3.3. Porovnanie IV charakteristík pred a po zahriatí; je vidieť, že prúd sa pri zahriatí detektore sa ustáli skôr než pri nezahriatí

Annealing - porovnanie CV charakteristík

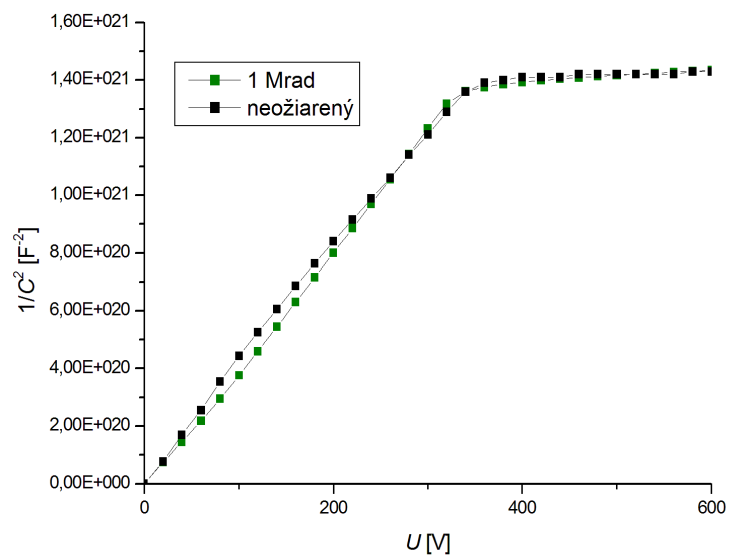


Graf 3.4. Porovnanie ožiarených detektorov protónmi pred a po ohriatí, jednotky v legende sú uvádzané v n_{eq}/cm^2 ; pre porovnanie je v grafe uvedený aj neožiarený detektor, napätie vyprázdnenia sa zmenšilo po ohriatí detektora

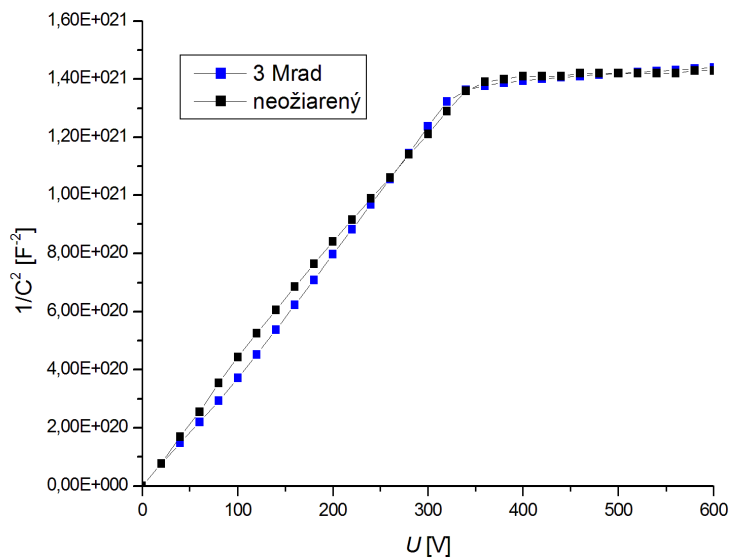
Ako ďalšie sme mali k dispozícii mini-detektory ožiarené gama žiarením rôznymi dávkami. Jednotkou ožiarenia je rad, čo je jednotka absorbovanej radiačnej dávky³. Pri gama ožiarení sú prúd a napätie vyprázdnenia približne rovnaké ako pri neožiarenom detektore. Je to kvôli tomu, že po ožiarení detektorov gama žiarením sa nezmenili objemové vlastnosti detektora.

V grafoch 3.5 až 3.7 uvádzame CV charakteristiky týchto detektorov. Kvôli neprehľadnosti sme ich rozdelili do troch grafov. Je vidieť, že tieto charakteristiky sú vhodné na určenie napätia vyprázdnenia presnejšie fitom, nie len odhadom. V programe, ktorým sme spúšťali meranie, sa nachádzala funkcia na fitovanie a fitoval sa priesečník 2 priamok. Výsledné hodnoty napätí vyprázdnenia sú uvedené v tab. 3.1.

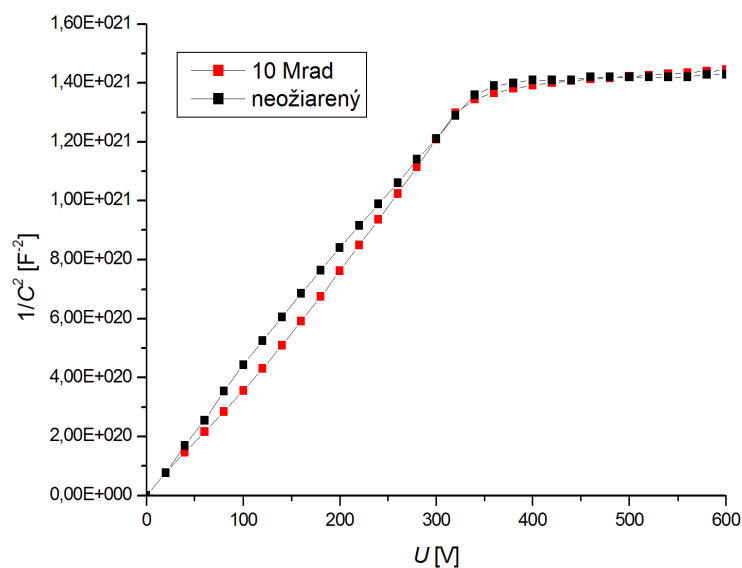
³ 1 rad = 0,01 J/kg [9]



Graf 3.5 CV charakteristika detektora ožiareného dávkou 1 Mrad porovnaná s CV charakteristikou neožiareného detektora



Graf 3.6 CV charakteristika detektora ožiareného dávkou 3 Mrad porovnaná s CV charakteristikou neožiareného detektora



Graf 3.7 CV charakteristika detektora ožiareného dávkou 10 Mrad porovnaná s CV charakteristikou neožiareného detektora

dávka gama	U_{depl} [V]
1 Mrad	338.1
3 Mrad	335.6
10 Mrad	343.5

Tabuľka 3.1 Napätia vyprázdnenia pre detektory ožiarené gama žiarením rôznych dávok

V grafoch boli uvedené pre porovnanie IV a CV charakteristiky neožiareného detektora, ktoré sme síce my nemerali, dáta sme dostali od Ing. Marcely Mikeščíkovej, Ph.D. Pri hodnotách napätia a prúdu sú uvádzané ich absolútne hodnoty, v skutočnosti na detektor bolo privádzané napätie záporné a prúdy namerané boli tiež záporné. Všetky charakteristiky boli merané pri teplote okolo -10°C a pri vlhkosti okolo 10%.

Záver

Záverom by sme zhrnuli výsledky tejto práce.

Najskôr sme popísali súčasný detektor ATLAS, bližšie sme sa venovali vnútornému detektoru a stripovým kremíkovým detektorom. Táto časť je popísaná stručnejšie, keďže nebola cieľom našej práce.

O niečo viac sme sa venovali princípu stripových kremíkových detektorov, pretože sa o ne zaujímame. Popísali sme najskôr vo všeobecnosti polovodiče, potom sme prešli k PN prechodu a nakoniec k samotnému kremíkovému detektoru. Takisto sme v jednej podkapitole popísali interakciu rôznych častíc s polovodičom a vplyv žiarenia na detektory.

Po pochopení rozloženia modulov a princípu samotných detektorov sme popísali pripravované vylepšenie detektoru ATLAS: ATLAS Upgrade. Opäť sme sa venovali konkrétnejšie vnútornému detektoru a stripovým kremíkovým detektorom. Snažili sme sa popísať hlavne tie najdôležitejšie zmeny, vynechanie TRT, pridanie dlhých stripových detektorov, či zmeny v umiestňovaní modulov do samotného detektoru.

Nakoniec sme do jednej prehľadnej tabuľky porovnali nami popisované vlastnosti ATLASa a ATLASa Upgrade, snažili sme sa hlavne porovnať vlastnosti, ktorými sa líšia.

Ako ďalšiu menšiu časť sme popísali testovanie detektorov v minulosti na ÚČJF MFF UK v rokoch 2004-2005. Takisto sme spomenuli pripravované testy detektorov pre ATLAS Upgrade. Táto časť je skôr informatívneho charakteru, pretože detektory sú v súčasnosti len vo fáze prototypov, informácie sa budú ešte meniť po vybratí správneho a funkčného detektoru spomedzi prototypov.

Nakoniec sme testovali detektory na FZÚ AV ČR pod vedením Ing. Marcely Mikeščíkovej, Ph.D. V tejto časti išlo hlavne o spoznanie laboratórneho prostredia a postupov merania. Merali sme IV a CV charakteristiky prototypov

stripových kremíkových detektorov, ktoré boli ožiarené protónmi a gama žiarením rôznych dávok kvôli porovnaniu.

Vyniesli sme charakteristiky do grafov a porovnávali sme ich vzájomne a s charakteristikou neožiareného detektora. Zistili sme, že po ožiarení protónmi sa prúd pri danom napätí zvýšil 1000 násobne a výrazne sa zvýši napätie vyprázdnenia detektora.

Porovnaním charakteristík pred a po zahriatí sme zistili, že sa zmenší napätie vyprázdnenia. Na porovnanie hodnôt napätia vyprázdnenia sa používajú hodnoty pred ožiarení a po zahriatí. Do jedného grafu sme vyniesli síce aj nezahriaty detektor kvôli porovnaniu už spomínaného zmenšenia napätia vyprázdnenia.

Pri gama ožiarení prúd aj napätie vyprázdnenia ostali približne rovnaké. Nakoniec sme na CV charakteristikách nafitovali napätie vyprázdnenia a výsledné hodnoty sme zhrnuli do tabuľky.

Výsledky tejto práce sú určitým prínosom. Tabuľka vlastností ATLASa a ATLASa Upgrade, ktorá je k dispozícii aj po anglicky, sa dá použiť pre prezentácie v budúcnosti a v prípade potreby je možné ju udržiavať aktuálnu. Takisto sme prispeli určitým podielom pri testovaní detektorov a hlavne sme sa zoznámili s prostredím a metódami využívanými v laboratóriu, čo môžeme využiť v ďalšom štúdiu.

Referencie

- [1] CERN [online], dostupné na WWW [cit. 5.5.2014]:
<<http://home.web.cern.ch/>>
- [2] Broklová, Z.: *Vyhodnocení účinnosti a kvality polovodičových stripových detektorů pro detektor ATLAS (LHC CERN)*, diplomová práce, 2003, UK, Praha, s. 1-35
- [3] Jakobs, K.: *Particle Detection and First Physics Results from the LHC* [online], kap. 2.3 *Silicon Semiconductor detectors*, dostupné na WWW [cit. 5.5.2014]:
<<http://portal.uni-freiburg.de/jakobs/dateien/dok/vietnam11d>>
- [4] Doležal, Z.: *Polovodičové detektory v jaderné a subjaderné fyzice*, poznámky k přednášce, 2007, Praha
- [5] ATLAS Collaboration: *ATLAS Letter of Intent Phase II Upgrade*, CERN-LHCC-2012-022, LHCC-I-023, 2012, s.1-5 a 57-104
- [6] Doležal, Z.: *The Quality Assurance of the ATLAS SCT End-Cap Detector Modules*, interná správa projektu ATLAS ATL-IS-QA-0004, 2002
- [7] Blue A.: *QA and Production Preparation: Modules*, 2013, prezentácia, doc. RNDr. Zdeněk Doležal, Dr. – osobná komunikácia
- [8] ATLAS Upgrade Strip Sensor Collaboration: *Supply of Silicon Microstrip Sensors of ATLAS12 specification*, 2013, verzia 1.5. Ing. Marcela Mikeščíková, Ph.D. - osobná komunikácia
- [9] Taylor B., Thompson A.: *The International System of Units (SI)* [online], 2008, s. 38, dostupné na WWW [cit. 5.5.2014]:
<<http://physics.nist.gov/Pubs/SP330/sp330.pdf>>

Zoznam použitých skratiek

CERN - "*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*", v preklade Európska organizácia pre jadrový výskum alebo Európske laboratórium časticovej fyziky

LHC - "*Large Hadron Collider*", v preklade Veľký hadrónový urýchľovač

LEP - "*Large Electron-Positron Collider*", v preklade Veľký elektrón-pozitrónový urýchľovač

PSP - "*Proton Synchrotron Booster*"

PS - "*Proton Synchrotron*"

SPS - "*Super Proton Synchrotron*"

obr. - obrázok

ID - "*Inner Detector*", v preklade Vnútorý detektor

TRT - "*Transition Radiation Tracker*", v preklade Detektor prechodového žiarenia

SCT - "*Semiconductor Tracker*", v preklade Polovodičový dráhový detektor

NIEL - "*Non-ionizing Energy Loss*", v preklade Neionizujúce energetické straty

HL-LHC - "*High Luminosity LHC*"

ITK - "*Inner Tracking System*", v preklade Vnútorý dráhový systém

tab. - tabuľka

ÚČJF - Ústav časticové a jaderné fyziky

FZÚ AV ČR - Fyzikální ústav Akademie věd České republiky

IV - voltampérova charakteristika

CV - závislosť kapacity na priloženom napätí

tzv. - takzvaný

Príloha

1. Porovnanie vlastností ATLASa a ATLASa Upgrade (anglicky)

	ATLAS		ATLAS Upgrade	
<i>Energy of particles</i>	4-7 TeV		7 TeV	
<i>Luminosity</i>	$\sim 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$		$\sim 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	
<i>Parts which compose barrels and disks</i>	barrel and end-cap module		larger stave and petal composed of several modules	
<i>Inner detector layers</i>	Pixel:	1 barrel (removable)	Pixel:	4 barrels
		2 barrels		
		4 disks		6 disks
	Strip:	4 barrels	Strip:	3 barrels (short)
		9 disks		2 barrels (long)
	TRT:	barrel part	Strip:	7 disks
end-cap part				
<i>Silicon area</i>	Pixel:	1,6 m ² barrel	Pixel:	5,1 m ² barrel
		0,7 m ² disk		3,1 m ² disk
	total:	2,3 m ²	total:	8,2 m ²
	Strip:	34,4 m ² barrel	Strip:	122 m ² barrel
		26,7 m ² disk		71 m ² disk
	total:	61,1 m ²	total:	193 m ²
<i>Number of channels [10⁶]</i>	Pixel:	97 barrel	Pixel:	445 barrel
		43 disk		193 disk
	Strip:	3,2 barrel	Strip:	47 barrel
		3,0 disk		27 disk
<i>Strip length</i>	12 cm		Short: 23,820 mm Long: 47,755 mm	
<i>Number of strips (on either sides)</i>	768		1280	
<i>Strip pitch</i>	80 μm		74,5 μm	

<i>Strip rotation</i>	40 mrad	40 mrad	
<i>Barrel range, coordinate r [mm]</i>	300 - 250	Pixel:	39 - 250
		Strip:	405-1000
<i>Disk range, coordinate z [mm]</i>	835 - 2788	Pixel:	877 - 1675
		Strip:	1400 - 3000