



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Lýdia Janitorová

**Testování křemíkových detektorů pro
modernizaci detektoru ATLAS**

Ústav částicové a jaderné fyziky

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

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2018

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) 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 má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

V prvom rade dakujem vedúcemu tejto bakalárskej práce, doc. RNDr. Zdenkovi Doležalovi, Dr., za cenné rady a čas, ktorý mi venoval pri tvorbe tejto práce.

Moja vďaka patrí taktiež celej stripovej skupine na MFF za prínosné pripomienky k použitým pracovným postupom a dosiahnutým výsledkom, najmä môjmu konzultantovi, RNDr. Mgr. Jiřímu Krollovi, Ph.D., za pomoc pri oboznámovaní sa s prístrojom ConoScan.

Ďakujem aj môjmu snúbencovi, Marekovi Martausovi, za veľkú podporu a pochopenie pri tvorbe tejto práce.

Název práce: Testování křemíkových detektorů pro modernizaci detektoru ATLAS

Autor: Lýdia Janitorová

Katedra: Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Zdeněk Doležal, Dr., Ústav částicové a jaderné fyziky

Abstrakt: V súčasnosti prebieha modernizácia detektoru ATLAS na ATLAS Upgrade. Ústav časticovej a jadrovej fyziky sa na nej podieľa testovaním a produkciou kremíkových detekčných modulov, ktoré budú k tomuto účelu použité. Táto práca je zameraná na vývoj metód presného zostavenia detekčných modulov, konkrétne overenie správneho nalepenia čipov na hybrid pomocou metrologickej stanice ConoScan 4000. Jedným z výstupov meraní sú tri súradnice rohov čipov. Pre dosiahnutie vyššej presnosti bola, namiesto určovania súradnice z čipu voči referenčnej sústave ConoScanu, určovaná výška čipu relatívne voči hybridu. Pre každý čip bol určený aj uhol jeho natočenia v jednotlivých rovinách. Na overenie opakovateľnosti merania prístrojom ConoScan bolo naskenovaných 50 identických meraní rezu hybridom, z ktorých spracované výsledky sú zakreslené v histogramoch. Presnosti určovania súradníc rohov čipov sa pohybujú v rámci požiadaviek detektoru ATLAS. Lepšie výsledky je možné dosiahnuť zvolením menšieho kroku skenovania ConoScanu pozdĺž osí x a y .

Klíčová slova: ATLAS Upgrade, kremíkový modul, skener ConoScan 4000

Title: Tests of Silicon detectors for the ATLAS detector upgrade

Author: Lýdia Janitorová

Department: Institute of Particle and Nuclear Physics

Supervisor: doc. RNDr. Zdeněk Doležal, Dr., Institute of Particle and Nuclear Physics

Abstract: Nowadays, the detector ATLAS is modernized to ATLAS Upgrade. The Institute of Particle and Nuclear Physics contributes to it by testing and production of silicon detection modules, which will be used for this purpose. This thesis is focused on the development of methods of accurate assembling of detection modules, especially to verify that the chips are properly glued to the hybrid using the ConoScan 4000 metrological station. One of the measurement outputs are three coordinates of the corners of the chips. To achieve higher accuracy, instead of determining the coordinate z of the chip relative to the ConoScan reference system, the height was determined relative to the hybrid. For each chip, the angle of rotation was determined in the individual planes. To verify the reproducibility of the measurement by ConoScan, 50 identical measurements of the hybrid profile were scanned, from which the processed results are plotted in histograms. Better results can be achieved by selecting a smaller scanning step of ConoScan along the x and y axes.

Keywords: ATLAS Upgrade, silicon module, scanner ConoScan 4000

Obsah

Úvod	3
1 Polovodičové detektory	4
1.1 Polovodiče	4
1.1.1 Základné charakteristiky	4
1.1.2 Pohyb nositeľov náboja	5
1.1.3 p - n prechod	5
1.2 Polovodiče ako detektory	5
1.2.1 Polohové kremíkové detektory	5
2 ATLAS	7
2.1 Popis experimentu ATLAS	7
2.1.1 Vnútorňý detektor	7
2.1.2 Kalorimetre a miónový spektrometer	8
2.2 ATLAS Upgrade	9
3 Detekčný modul vnútorného detektoru ATLAS	10
3.1 Popis detekčného modulu	10
3.2 Požiadavky na presnosť	10
3.2.1 Presnosť v rovine x - y	12
3.2.2 Presnosť v smere osi z	12
3.2.3 Presnosť určenia hybnosti	12
4 Merací prístroj ConoScan	14
4.1 ConoScan 4000	14
4.1.1 Špecifikácie prístroja ConoScan 4000	14
4.2 Použité nastavenia	15
5 Použité postupy a programy	16
5.1 Motivácia zvolených postupov	16
5.1.1 Skenovanie rezu hybridom	16
5.1.2 Zosuv skenovacej hlavice	17
5.1.3 Náklon podložky	18
5.2 Popis použitých postupov a programov	19
5.2.1 Relatívna výška čipov	19
5.2.2 Súradnice rohov čipov	19
5.2.3 Náklon čipov	21
5.2.4 Opakovateľnosť merania	21
5.3 Určovanie chýb merania	22
5.3.1 Chyba určenia x -ovej a y -ovej súradnice rohu čipu	22
5.3.2 Chyba určenia relatívnej výšky rohu čipu	23
5.3.3 Chyba určenia veľkosti uhlu náklonu čipu	23

6	Vyhodnotenie výsledkov	25
6.1	Súradnice rohov čipov	25
6.2	Náklon čipov	25
6.3	Opakovateľnosť merania	27
7	Diskusia	31
7.1	Diskusia výsledkov	31
7.2	Dosiahnutie lepších presností	31
	Záver	33
	Zoznam použitej literatúry	34
	Zoznam obrázkov	35

Úvod

Európske laboratórium fyziky častíc, CERN, sa zaoberá štúdiom mikrosveta, elementárnych častíc a fundamentálnych síl. Súčasťou tohto výskumného stredu je Veľký hadrónový urýchľovač (LHC). Jedným zo štyroch hlavných experimentov umiestnených na LHC je detektor ATLAS zaoberajúci sa skúmaním javov pri zrážkach protónov o veľmi vysokých energiách.

V súčasnosti prebieha modernizácia detektoru ATLAS na ATLAS Upgrade zameraná na zvýšenie luminozity LHC. Laboratórium Ústavu časticovej a jadrovej fyziky sa pripravuje na účasť v produkcii kremíkových detekčných modulov použitých pre túto modernizáciu. Jedným z dôležitých predpokladov tejto produkcie je zaistenie presnosti zostavenia modulov, k čomu slúži metrologická stanica ConoScan 4000.

Cielom tejto práce bolo podieľať sa na overovaní presnosti montáže kremíkových detektorov pre modernizáciu dráhového detektoru ATLAS a na stanovení optimálneho postupu tohto merania a vyhodnotenie výsledkov.

Prvá kapitola je venovaná popisu základných vlastností polovodičov a polovodičových detektorov, konkrétne polohovým kremíkovým detektorom použitých v detektore ATLAS.

V druhej kapitole je popísaný experiment ATLAS a jeho štyri subsystémy: vnútorný dráhový detektor, elektromagnetický kalorimeter, hadrónový kalorimeter a mionový spektrometer.

Tretia kapitola je venovaná popisu kremíkového detekčného modulu vnútorného detektoru ATLAS pozostávajúceho z hybridu s rýchlymi čítacími čipmi nalepenom na kremíkovom stripovom senzore. V tejto kapitole sú popísané aj požiadavky na presnosť nalepenia čipov na hybrid.

Vo štvrtej kapitole je stručne popísaný merací prístroj ConoScan 4000, jeho vlastnosti a nastavenia použité pri meraniach.

Kapitola 5 je venovaná motivácii a detailnému popisu zvolených pracovných postupov.

Šiesta kapitola pojednáva o výsledkoch meraní, ktoré pozostávajú z určenia x -ových a y -ových súradníc rohov čipov a z relatívnej výšky h čipu voči hybridu, na ktorom je nalepený. Určované boli aj náklony jednotlivých čipov v rovinách x - y , x - h , y - h a uhly medzi rovinami čipov a rovinou o rovnici $z = 0$. Na overenie opakovateľnosti merania súradníc čipov prostredníctvom prístroja ConoScan 4000 bolo prevedených 50 identických meraní, ktorých výsledky sú prezentované v tejto kapitole.

Posledná kapitola je venovaná diskusii výsledkov.

1. Polovodičové detektory

1.1 Polovodiče

1.1.1 Základné charakteristiky

Polovodiče sú látky zo IV.A skupiny periodickej sústavy prvkov. Vyznačujú sa kubickou plošne centrovanou mriežkovou štruktúrou so štyrmi valenčnými elektrónmi.

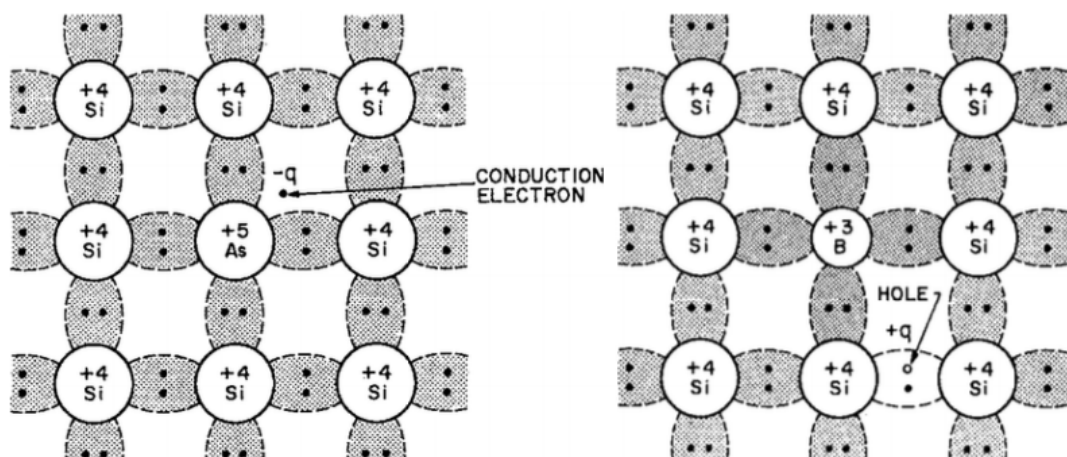
Pri teplotách blízkyh absolútnej nule sú nevodivé. S rastúcou teplotou sa prostredníctvom tepelných kmitov dostávajú z valenčného do vodivostného pásu, čím sa stávajú slabo vodivými.

Polovodiče môžeme rozdeliť na vlastné a nevlastné. Vlastné polovodiče sú zložené iba z atómov svojho druhu, teda neobsahujú žiadne prímеси ani nečistoty. V praxi sa používajú len ojedinele, pretože je náročné dosiahnuť požadovanú čistotu.

Do nevlastných polovodičov sa kvôli zvýšeniu vodivosti zvyknú pridávať cudzie atómy zámerné. Takto spôsobená vodivosť sa nazýva prímesová. Rozoznávame dva druhy nevlastných polovodičov (viď obr. 1.1).

Ak do vlastného polovodiča pridáme prímесь obsahujúcu atómy s jedným valenčným elektrónom navyše, bude tento piaty elektrón viazaný na atóm iba nepatrne, teda môže viesť elektrický prúd. Tieto prímеси sa nachádzajú v V.A skupine periodickej sústavy prvkov, nazývame ich donory a spôsobujú vodivosť typu n .

Ak sú naopak v kryštálovej mriežke prítomné atómy s tromi valenčnými elektrónmi, vznikajú nezaplnené miesta po valenčných elektrónoch, ktoré sa volajú diery. Diera v elektrickom poli postupuje proti smeru pohybu elektrónov. Tieto prímеси berieme z III.A skupiny, nazývajú sa akceptory a príspevok k vodivosti vzniknutý pohybom dier nazývame vodivosť typu p .



Obr. 1.1: Nevlastný polovodič typu n (vľavo) a polovodič typu p (vpravo), prevzaté z [1]

1.1.2 Pohyb nositeľov náboja

V dôsledku pôsobenia vonkajšej elektrickej sily konajú elektróny a diery pohyb, ktorý nazývame drift.

Ďalším z možných pohybov nositeľov náboja je difúzia. Ide o pohyb, ktorý vzniká kvôli nerovnomernému rozmiestneniu nositeľov náboja. Náboj sa premiestňuje z miest s vyššou do miest s nižšou koncentráciou náboja.

Na nabité častice v elektromagnetickom poli pôsobí Lorentzova sila

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}),$$

ktorá ich vychyluje od pôvodnej dráhy. Prejaví sa Hallov jav, teda zníženie prúdu, ktorý tiekol polovodičom pred umiestnením do elektromagnetického poľa.

1.1.3 *p-n* prechod

Pri spojení polovodičov s opačným dotovaním vzniká oblasť, ktorú nazývame *p-n* prechod. Elektróny sa presúvajú z oblasti typu *n* do oblasti typu *p*, až kým sa nevytvorí také napätie, ktoré bude brzdiť difúziu elektrónov do oblasti *p*. Podobne difundujú diery z oblasti *p* do *n*, pričom v oblasti *p* zanechávajú nadbytok záporného náboja. V oblasti *p-n* prechodu vzniká vyprázdnená oblasť a vytvára sa vnútorné napätie. U polovodičových detektorov sa väčšinou požaduje, aby bola vyprázdnená oblasť čo najširšia, preto sa využíva zapojenie diódy do obvodu v záverom smere.

1.2 Polovodiče ako detektory

Nabitá častica môže uvoľniť nositeľa náboja v kryštále pevnej látky. Ich odvedením k elektródam získame elektrický signál. Polovodičové detektory sa vyznačujú výborným energetickým, časovým a priestorovým rozlíšením, veľkou mechanickou pevnosťou a tým, že ich je možné vyrábať aj v malých rozmeroch.

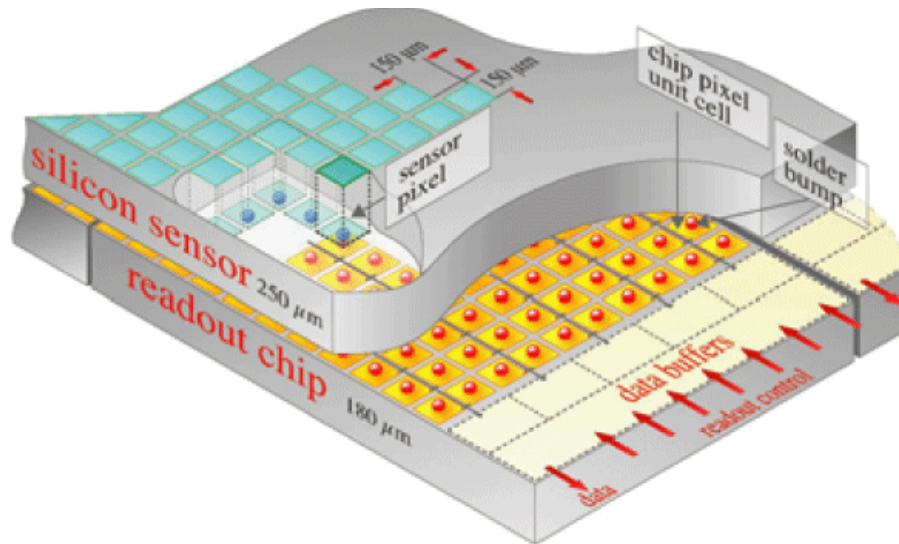
Polovodičové detektory sa najčastejšie vyrábajú z kremíka alebo germánia. Majú mnohé aplikácie, napr. v γ spektroskopii, röntgenovej spektroskopii, ako detektory pre meranie energie, či radiácie. S ohľadom na experimentálnu časť tejto práce si bližšie popíšeme iba využitie polovodičov na určovanie dráhy častice.

1.2.1 Polohové kremíkové detektory

V snahe čo najpresnejšie určiť polohu častice sa využíva rozdelenie elektród na tenké prúžky alebo malé obdĺžniky. V prípade elektród rozdelených na prúžky hovoríme o stripových detektoroch. Jednotlivé prúžky sú široké niekoľko desiatok až stoviek μm . Každý zo stripov musí mať vlastnú vyčítaciu elektroniku, čo obmedzuje ich počet a vzájomnú vzdialenosť. Pre získanie úplnej priestorovej informácie sa zvyknú používať dva rady stripov umiestnených kolmo na seba.

Detektory s elektródami rozdelenými na malé pravouholníky o typických rozmeroch $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ nazývame pixelové detektory. Podobne ako u obojstranných stripových detektorov dokážeme získať dvojrozmernú informáciu o polohe častice. Problémom sa však stáva odvádzanie zozbieraného náboja do elektroniky.

Umiestnenie vodivých trás na detektor neprichádza do úvahy, preto je nutné náboj vyviešť mimo rovinu detektoru, čo umožňujú hybridné pixelové detektory (viď obr. 1.2). Skladajú sa z detektoru a čipu, ktorého vstupné plošky kopírujú rozloženie pixelov. Na tieto plošky sa umiestnia malé guľičky kovu, a potom sa detektor s čipom k sebe pritlačia.



Obr. 1.2: Hybridný pixelový detektor, prevzaté z [2]

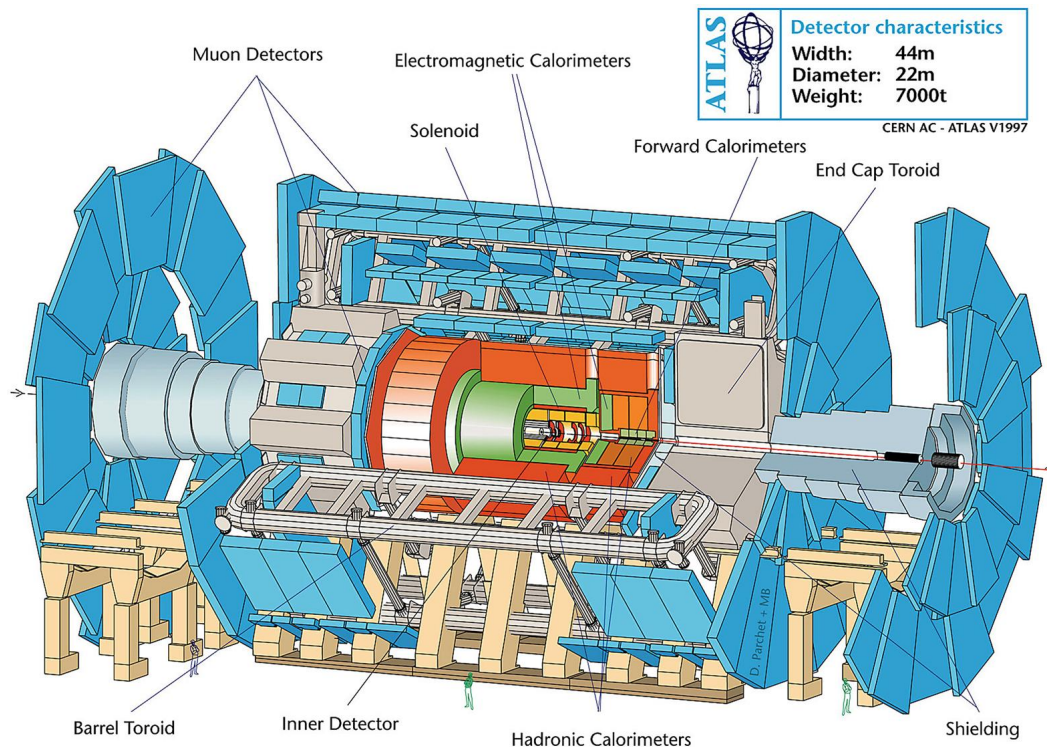
Ďalšiu možnosť riešenia problému s odvádzaním zozbieraného náboja nám ponúkajú monolitické detektory, u ktorých sú detektory aj elektronika vyrobené z kremíka.

2. ATLAS

2.1 Popis experimentu ATLAS

ATLAS je časticový experiment na Veľkom hadrónovom urýchľovači (LHC) v CERN, ktorý skúma javy pri zrážkach protónov o veľmi vysokých energiách.

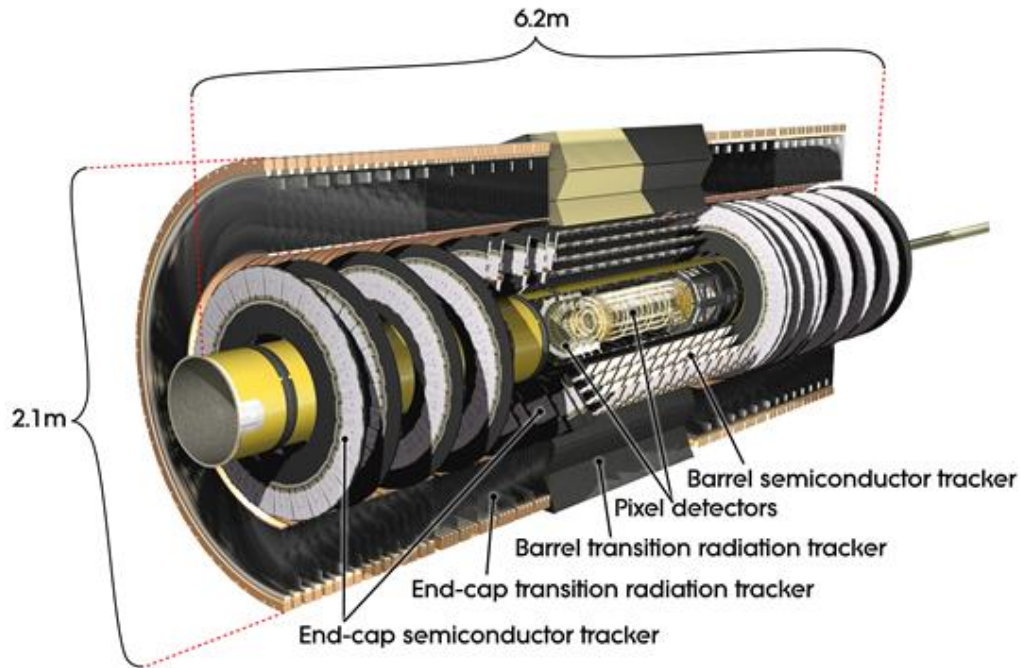
Ide o detektor s dĺžkou 44 metrov a priemerom 22 metrov. Skladá sa zo štyroch subsystémov, ktoré je možné vidieť aj na obr. 2.1: vnútorný dráhový detektor, elektromagnetický kalorimeter, hadrónový kalorimeter, mionový spektrometer.



Obr. 2.1: Schéma experimentu ATLAS: vnútorný detektor (žltá farba), elektromagnetický kalorimeter (zelená), hadrónový kalorimeter (červená), mionový spektrometer (modrá), prevzaté z [3]

2.1.1 Vnútorný detektor

K miestu zrážky a vzniku veľkého množstva častíc má najbližšie vnútorný detektor. Jeho hlavnou úlohou je detegovať trajektórie elektricky nabitých častíc vyprodukovaných pri zrážke. Skladá sa z troch hlavných častí: pixelový detektor, stripový detektor a detektor prechodového žiarenia (viď obr. 2.2). Každá časť je zložená z niekoľkých súosových valcov (barrel) umiestnených okolo urýchľovacej trubice. Valce sú na oboch stranách uzatvorené diskami (end-cap). Vnútorný detektor je obklopený magnetickým poľom supravodivej valcovej cievky o indukcii 2 T. Nabité častice vplyvom magnetického poľa zakrivujú svoju trajektóriu. Pomocou vnútorného detektoru je možné presne zmerať ich hybnosť.



Obr. 2.2: Schéma vnútorného detektora experimentu ATLAS, prevzaté z [4]

Pixelové detektory sú umiestnené najbližšie k miestu interakcie. Skladajú sa z kremíkových doštičiek s pixelmi o rozmeroch $50 \times 400 \mu\text{m}^2$. Majú výborné priestorové rozlíšenie a používajú sa pre identifikáciu krátko žijúcich častíc.

Stripový detektor (Semiconductor Tracker - SCT) obsahuje kremíkové stripové detektory so stripmi o rozstupe $80 \mu\text{m}$. Vďaka tomuto detektoru je možné sledovať trajektóriu nabitých častíc, no na väčšej škále vzdialeností ako pri pixelovom detektore.

V najväčšej vzdialenosti od miesta zrážky je umiestnený detektor prechodového žiarenia (Transition Radiation Tracker - TRT). Je to sústava plynom plnených trubičiek s priemerom 4 mm obklopených materiálom vyvolávajúcím vznik prechodového žiarenia. TRT je schopný rozlíšiť elektróny od ťažkých častíc, pretože elektrón emituje prechodové žiarenie pri rádovo nižších energiách než napr. pión.

2.1.2 Kalorimetre a miónový spektrometer

V elektromagnetickom kalorimetri sa pohltí a zmeria energia elektrónov, pozitronov a fotónov. Vznikajú v ňom elektromagnetické spŕšky tak, že elektrón alebo pozitron pri prelietavaní kalorimetrom vyžiaria fotón, čím stratia časť svojej energie. Fotón následne vytvorí pár elektrónu s pozitronom, ktoré ďalej vyžarujú fotóny atď.

Úlohou hadrónového kalorimetra je merať energiu hadrónov (napr. protónov, neutrónov, piónov). Častice v ňom vytvárajú elektromagnetické aj hadrónové spŕšky.

Mióny sú veľmi málo interagujúce častice, ktoré zvyčajne pomocou vnútorného detektora a kalorimetrov nie je možné detegovať. Miónový spektrometer však umožňuje merať ich dráhu a energiu.

2.2 ATLAS Upgrade

V súčasnej dobe sa pripravuje modernizácia detektoru ATLAS, nazývaná aj ATLAS Upgrade, s plánovaným spustením v roku 2026 [5]. Zameriava sa na zvýšenie luminozity LHC, v dôsledku čoho musí byť mnoho častí detektoru vymenených za časti odolnejšie voči radiácii.

Súčasťou modernizácie je aj výmena vnútorného detektoru za tzv. ITk (Inner Tracker). Ten sa bude skladať iba z kremíkových pixelových a stripových detektorov, pričom detektor prechodového žiarenia bude vynechaný.

Ústav časticovej a jadrovej fyziky (ÚČJF) v spolupráci s Fyzikálnym ústavom Akadémie vied Českej republiky (FZÚ AV ČR) sa podieľa na modernizácii testovaním a produkciou kremíkových detekčných modulov, ktoré budú k tomuto účelu použité.

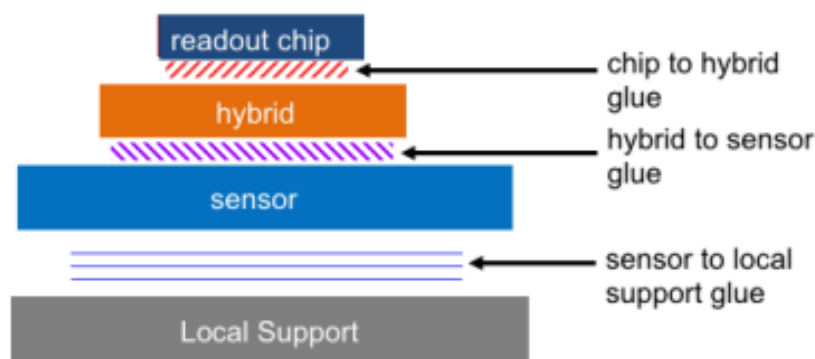
3. Detekčný modul vnútorného detektoru ATLAS

3.1 Popis detekčného modulu

Základnú detekčnú jednotku stripového vnútorného dráhového detektora tvorí kremíkový modul. Ten pozostáva z kaptonovej vyčítacej dosky s rýchlymi čítacími čipmi, nazývanej aj hybrid, nalepenej na kremíkovom stripovom senzore (viď schéma na obr 3.1). Kanály na moduloch a hybridoch sú spájané prostredníctvom wirebondov¹ umožňujúcich vyčítanie a napájanie.

Viacere moduly sú umiestnené na podpornú štruktúru zabezpečujúcu elektrické pripojenie a chladenie. Podporná štruktúra sa bude na detektore nachádzať v dvoch typoch zoskupení - petal (lupen) a stave (lišta).

Petal má tvar klínu a 32 z nich vytvorí jeden disk koncového uzáveru detektora. Moduly sa odlišujú vo veľkostiach a v oblasti vonkajšieho polomeru petalu sú vedľa seba prilepené dva moduly.



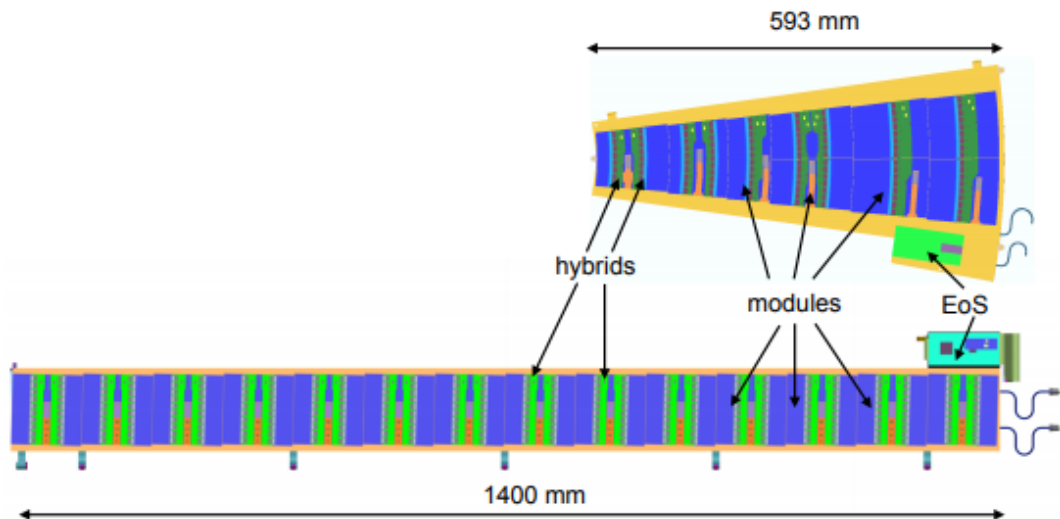
Obr. 3.1: Náčrt prierezu detekčného modulu na podpornej štruktúre, prevzaté z [5].

3.2 Požiadavky na presnosť

Lepidlo medzi jednotlivými vrstvami bolo vyberané veľmi dôsledne. Medzi dôležité požiadavky patrilo podľa [5] napr. umožnenie dobrého elektrického výkonu pripojených komponentov, dostatočná tepelná vodivosť, dostatočne silné mechanické spojenie, nízka radiačná dĺžka, rozsah pracovných teplôt v prevádzkových teplotách vnútorného stripového detektora.

Na overenie kvality zostavenia detekčných modulov sa prevádza mnoho testov zameraných na presnosť ich zostavenia, kontrolu ich elektrickej funkčnosti, či termomechanických vlastností. V rámci tejto práce sme sa venovali overeniu správneho nalepenia čipov na hybrid.

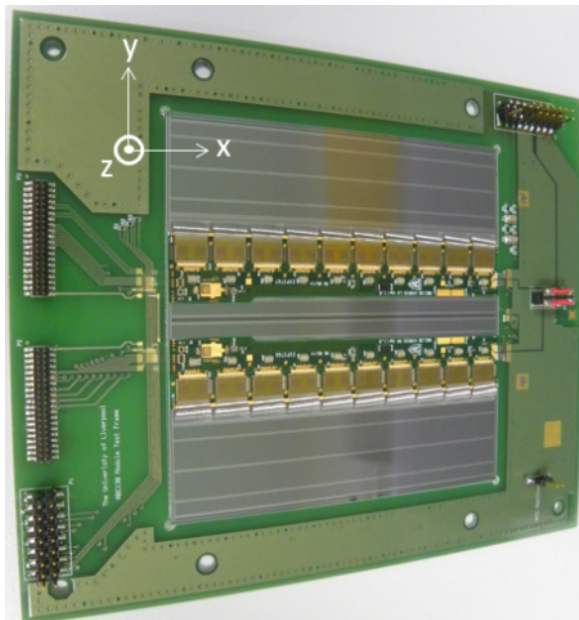
¹Wirebonding, resp. spájanie prostredníctvom kontaktovacích drôtikov, je ultrazvuková zväracia technika typicky s drôtom o priemere 25 μm zo zliatiny hliníka a kremíka.



Obr. 3.2: Schéma usporiadania podpornej štruktúry: petal (hore), stave (dole). Vyznačené sú na nej moduly, hybridy a EoS (End of Substructure = karta zabezpečujúca rozhranie). [5]

Pomenovanie osí používané v ďalších kapitolách bolo zavedené tak, ako je to vyznačené na obr. 3.3:

- os x - os kolmá na stripy
- os y - os rovnobežná so stripmi
- os z - os smerujúca von z modulu

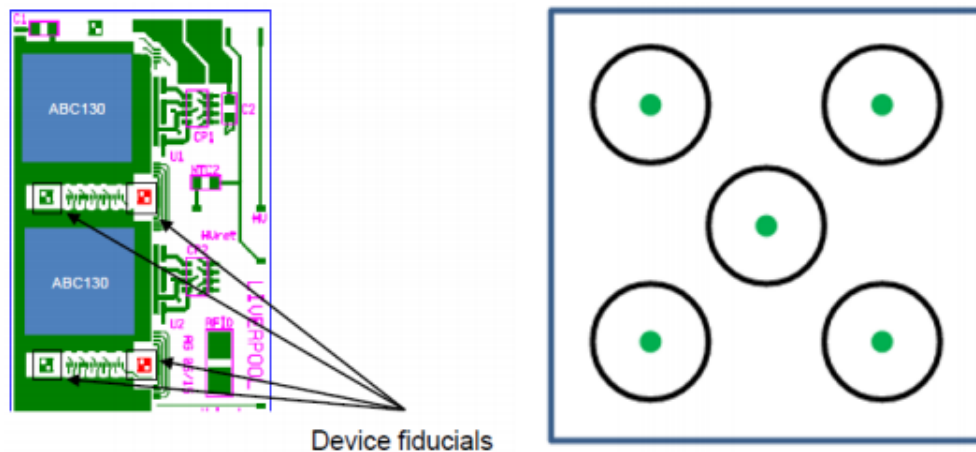


Obr. 3.3: Označenie osí modulu. Os x je kolmá na stripy, os y je rovnobežná so stripmi a os z smeruje von z modulu. [5]

3.2.1 Presnosť v rovine $x-y$

Po prilepení čipu na hybrid je potrebné overiť správne umiestnenie čipov voči hybridu v rovine $x-y$. Akákoľvek väčšia odchýlka od plánovaného umiestnenia by mohla spôsobiť problémy pri wirebondovaní.

Umiestnenie čipov sa bude merať vzhľadom k referenčným bodom na hybride (viď obr. 3.4). Maximálna povolená odchýlka čipu od vopred stanovenej polohy na hybride je podľa [5] $100\ \mu\text{m}$.



Obr. 3.4: Vľavo: referenčné značky na hybridoch na meranie x -ovej a y -ovej súradnice nalepených čipov. Vpravo: päť značiek na každej podložke pre čip určených k výpočtu výšky lepidla. [5]

3.2.2 Presnosť v smere osi z

Požadovaná hrúbka vrstvy lepidla medzi čipom a hybridom bola podľa [5] určená na $(80 \pm 20)\ \mu\text{m}$ po pritlačení čipu na hybrid. Ak by bola vzdialenosť čipu a hybridu väčšia, lepidlo by nemuselo správne zaschnúť a čip by sa po opakovaných zmenách teplôt mohol oddeliť od hybridu. V prípade menšej vrstvy lepidla bolo pozorované vytečenie lepidla z okrajov čipov, čo spôsobilo problémy pri wirebondovaní.

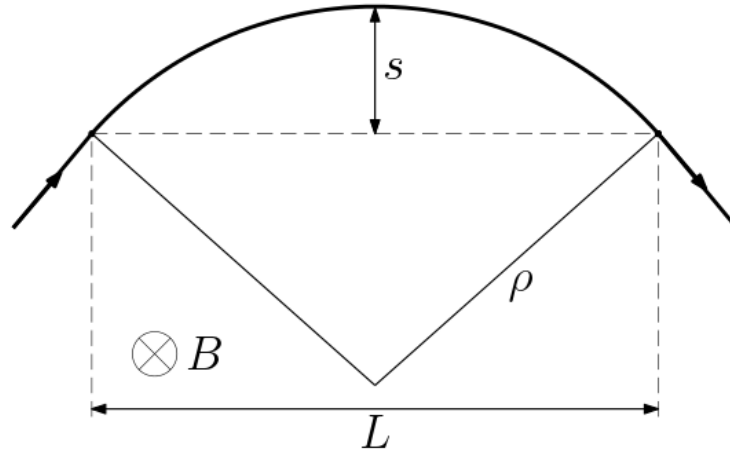
Na každom hybride sa nachádzajú podložky, na ktoré sa budú umiestňovať čipy. Na každej z podložiek je päť referenčných bodov, čo je možné vidieť aj na obr. 3.4. Pred nalepením čipu sa zmeria z -ová súradnica každého z týchto piatich bodov, čím vznikne rovina popisujúca podložku daného čipu. Po nalepení čipu sa zmeria súradnica z v rovnakých x -ových a y -ových súradniciach ako pred nalepením čipu, čím sa znova skonštruuje rovina. Výška lepidla je vypočítaná ako vzdialenosť týchto dvoch rovín po odpočítaní hrúbky čipu ($300\ \mu\text{m}$).

3.2.3 Presnosť určenia hybnosti

Nech častica v oblasti homogénneho magnetického poľa B o dĺžke L zahýba s polomerom ohybu ρ (viď obr. 3.5). Ak je priehyb s (sagitta) určený tromi ekvidišťatnými bodmi, tak priestorové rozlíšenie σ_x súvisí s rozlíšením priečnej

hybnosti σ_{p_T} nasledovne [6]:

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{8 p_T}{0,3 B L^2} \sigma_x.$$



Obr. 3.5: Trajektória častice v oblasti magnetického poľa B o dĺžke L

Priestorové rozlíšenie v jednom rozmere je u stripových detektorov pri binárnom vyčítaní² dané vzťahom [6]

$$\sigma(x) = \frac{\tilde{p}}{\sqrt{12}},$$

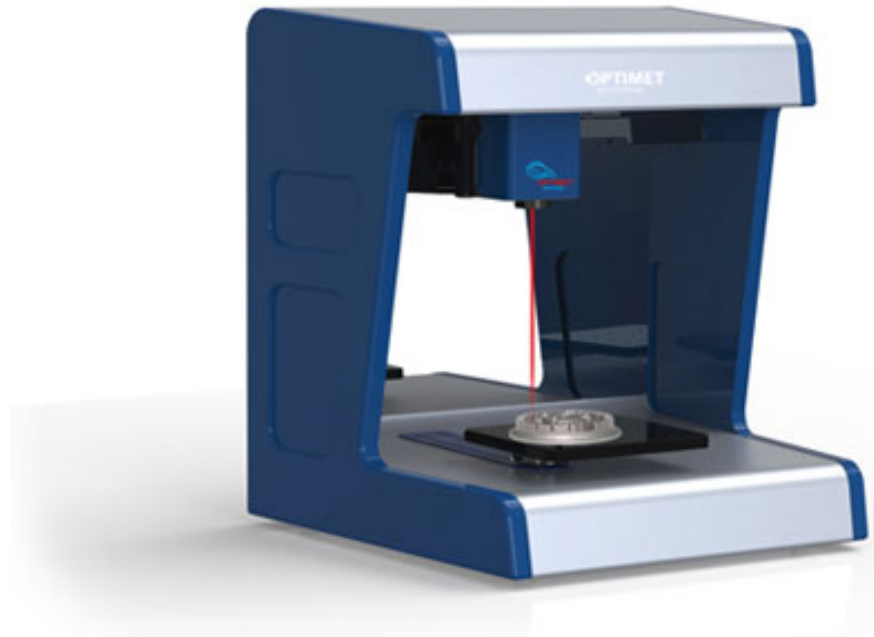
pričom \tilde{p} je rozostup stripov.

²Predáva sa iba logická informácia, ktorá hovorí o tom, či signál prekročil nastavený prah.

4. Merací prístroj ConoScan

4.1 ConoScan 4000

ConoScan 4000 (viď obr. 4.1) od firmy Optimet je nekontaktný 3D skener s vysokou presnosťou snímania. Využíva konoskopickú holografii, čo znamená, že laserový lúč je premietaný na snímaný povrch a jeho odraz vytvára holografický vzor vo vnútri snímača. Tento vzor sa neskôr analyzuje a vypočíta sa vzdialenosť medzi senzorom a povrchom, vďaka čomu je možné získať súradnicu z .



Obr. 4.1: Prístroj ConoScan 4000, prevzaté z [7]

ConoScan umožňuje merať rozličné druhy materiálov a skúmať rôzne parametre, ako napríklad presný priemer, výšku predmetov, hĺbku dier, uhol sklonu, či vzájomnú vzdialenosť objektov.

Pomocou tohto prístroja je možné skenovať plochu, rez objektom alebo krivku. Skenovanie plochy pri malom zvolenom kroku pozdĺž osí x a y je časovo náročné (pre bližšiu predstavu viď [8]), preto sme skenovali rezy objektom.

4.1.1 Špecifikácie prístroja ConoScan 4000

ConoScan 4000 má vymeniteľné objektívy so šošovkami s ohniskovou vzdialenosťou od 25 mm do 100 mm. Počas všetkých meraní sme pracovali s 25 mm šošovkou, pri ktorej je podľa [7] presnosť merania súradnice z 3 μm .

Skenovacia plocha v rozmeroch $x \times y$ je 160 mm x 150 mm. Maximálna výška skenovaného objektu môže byť 130 mm. Minimálny krok skenovania pozdĺž osi x alebo y je 1,5 μm . [7]

4.2 Použité nastavenia

Pri všetkých meraniach sme skenovali pozdĺž osí x a y s krokom $50\ \mu\text{m}$. Možnosti *Total Minimum* a *SNR Minimum* boli nastavené na nulu, aby sme neprišli o žiadne údaje.

Vzdialenosť skenovacej hlavice od podložky (nastavená zhruba na 17 mm) bola spolu s intenzitou lasera volená tak, aby bola hodnota *SNR*, vyjadrujúca kvalitu signálu, čo najvyššia (zvyčajne okolo 620). Všetky ostatné nastavenia boli ponechané tak, ako boli prednastavené.

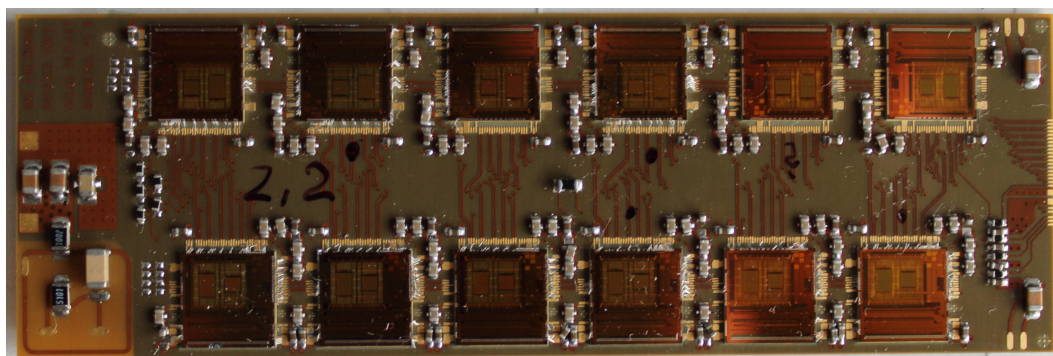
Podrobný návod k používaniu prístroja ConoScan 4000 je popísaný v [9].

5. Použité postupy a programy

5.1 Motivácia zvolených postupov

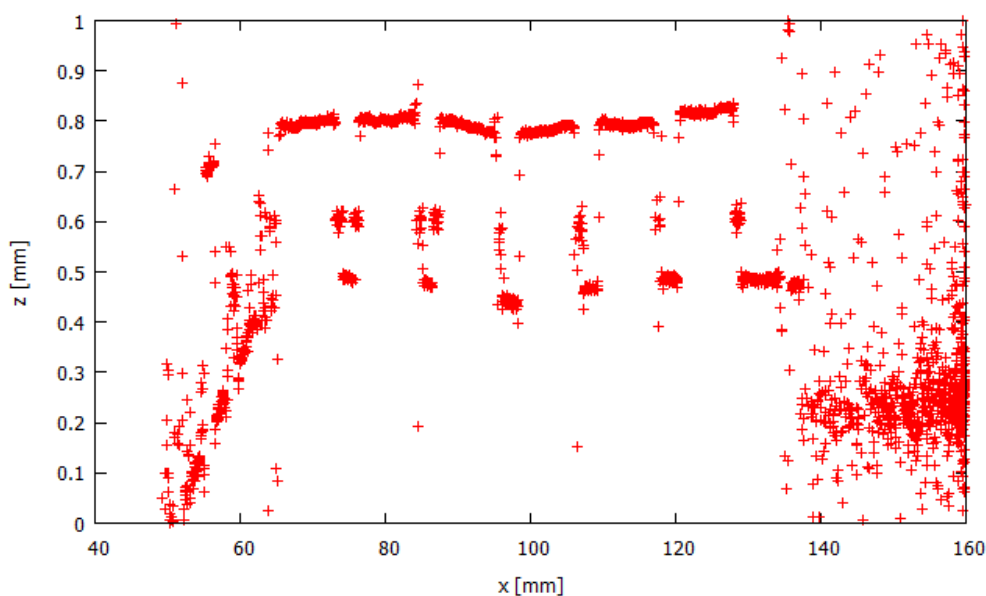
5.1.1 Skenovanie rezu hybridom

Všetky merania prebiehali s hybridom na obr. 5.1, ktorý tvoria dva rady šiestich čipov obdĺžnikového tvaru. Ide o starší model hybridu, ktorý sme používali ako skúšobný. Na rozdiel od hybridov, ktoré budú použité v ITk, však tento hybrid nemá referenčné značky, ktoré boli spomínané v kapitole 3.2.

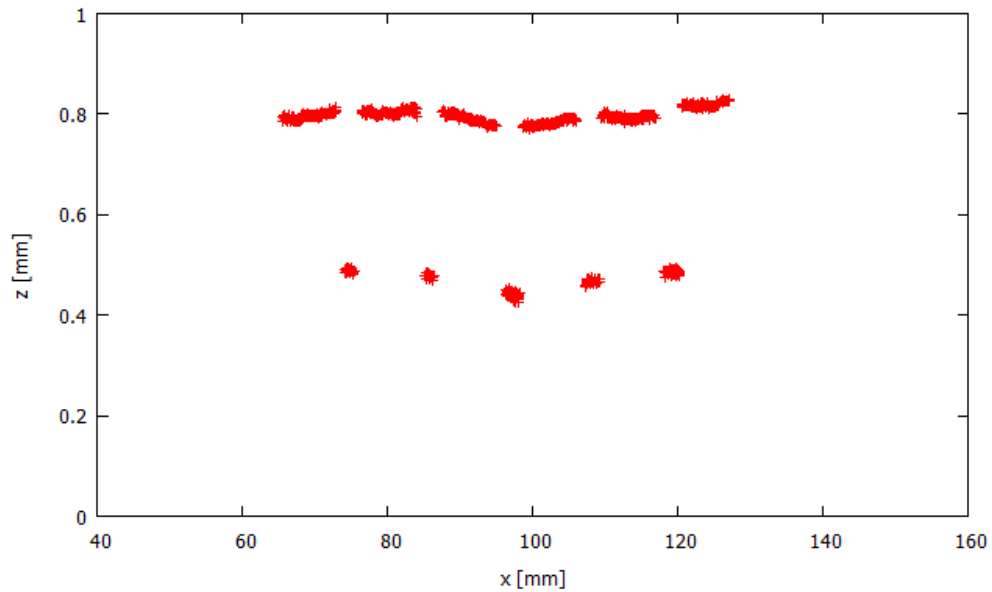


Obr. 5.1: Meraný hybrid

Nameraný rez hybridom vyzerá ako na obr. 5.2, pričom súradnice jednotlivých bodov sú merané voči referenčnej sústave ConoScanu. V rámci môjho predchádzajúceho študentského projektu (viď [8]) sme vytvorili program v systéme ROOT [10], ktorý v nameraných dátach dokáže vyhľadať čipy a hybrid medzi nimi a určiť, v ktorej x -ovej, resp. y -ovej súradnici začínajú alebo končia. Dáta po vytriedení čipov a hybridu medzi nimi vyzerajú ako na obr. 5.3.



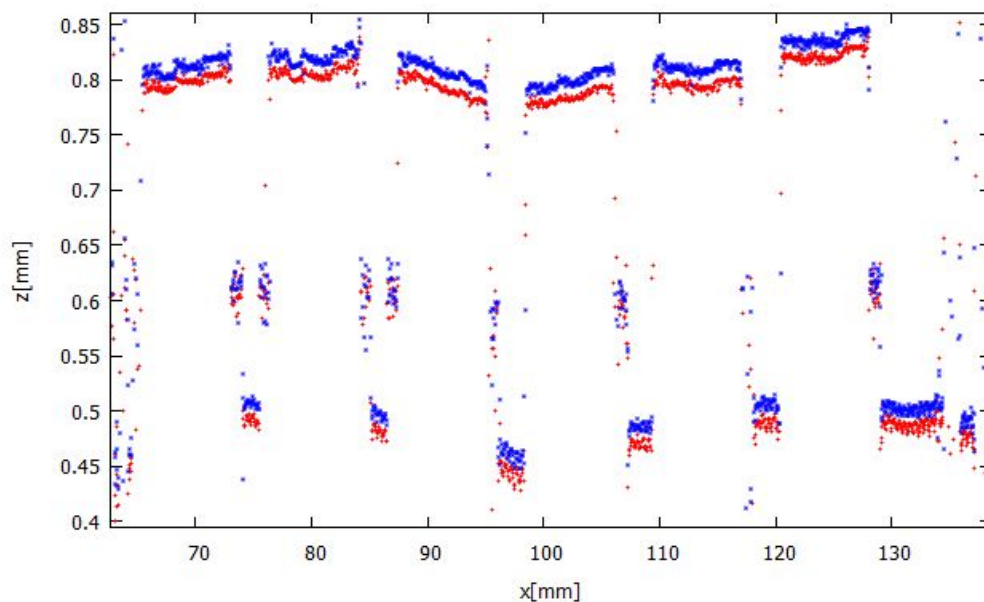
Obr. 5.2: Rez hybridom naskenovaný pomocou prístroja ConoScan



Obr. 5.3: Separácia nameraných dát rezu hybridom na čipy ($z \approx 0,8$ mm) a hybrid medzi nimi ($z \approx 0,5$ mm)

5.1.2 Zosuv skenovacej hlavice

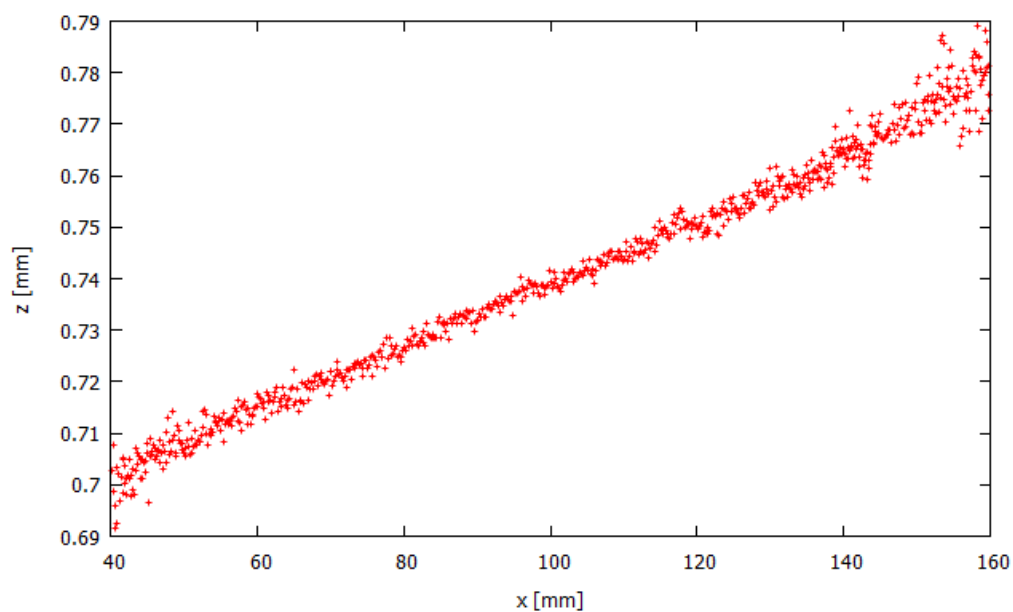
Počas práce s ConoScanom sme narazili na problém spočívajúci v tom, že pri dvoch identických meraniach sme namerali odlišné súradnice z celého hybridu, čo je možné vidieť aj na obr. 5.4. Je to pravdepodobne spôsobené zosuvom skenovacej hlavice ConoScanu pri opakovaných meraniach. Relatívne výšky však vyzerali byť rovnaké, čo ovplyvnilo náš postup pri ďalšom spracovávaní dát.



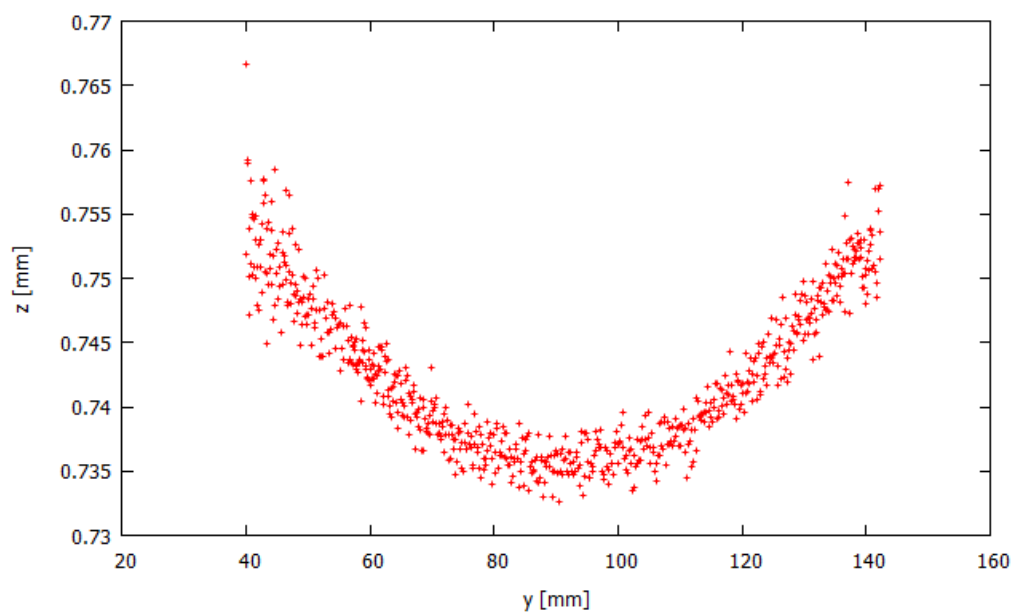
Obr. 5.4: Odlišné dáta namerané pri rovnakých nastaveniach ConoScanu

5.1.3 Náklon podložky

Pri meraniach sme si všimli aj to, že podložka ConoScanu, voči ktorej tento prístroj určuje súradnice naskenovaných bodov, je v smere osi x mierne naklonená a v smere osi y prehnutá. Pri určovaní relatívnej výšky čipov však táto skutočnosť nehrá dôležitú úlohu.



Obr. 5.5: Rez podložky ConoScanu pozdĺž osi x



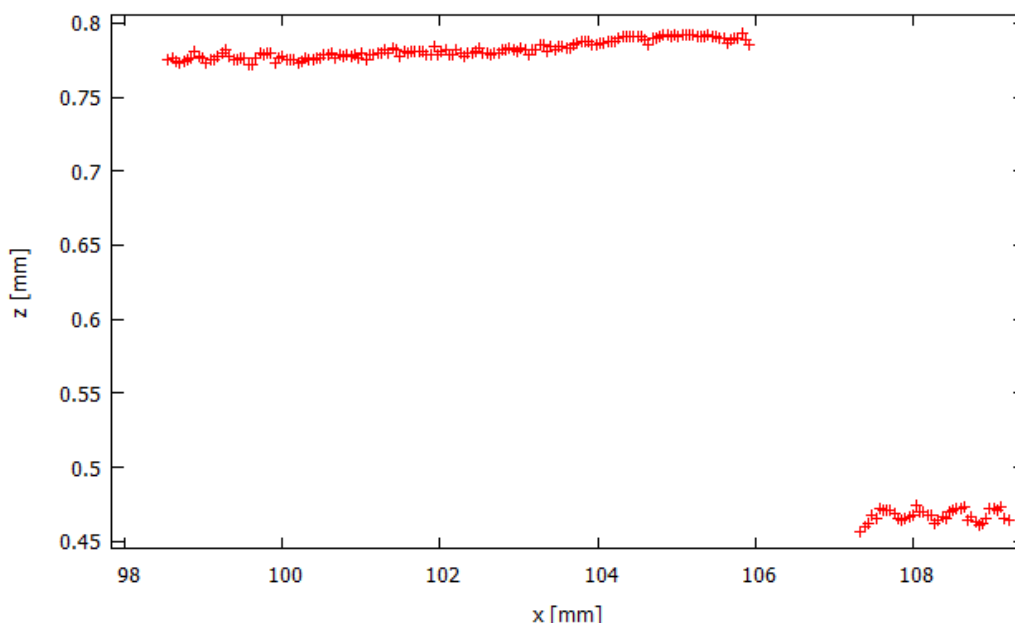
Obr. 5.6: Rez podložky ConoScanu pozdĺž osi y

5.2 Popis použitých postupov a programov

5.2.1 Relatívna výška čipov

Na vyhodnocovanie relatívnej výšky čipov voči podložke pre dané čipy na hybride sme napísali program v systéme ROOT. Na obr. 5.7 je detail rezu, na ktorom je možné vidieť jeden čip a hybrid medzi ním a ďalším čipom. Hybrid má na sebe nerovnosti a na rozdiel od čipu nepripomína lineárnu funkciu. Preto spomínaný program každý z čipov nafituje lineárnou funkciou a z bodov prislúchajúcich hybridu medzi čipmi vypočíta priemernú hodnotu.

Pre vytvorenie roviny podložky čipu spojí náš program posledný bod časti hybridu pred daným čipom s prvým bodom nasledujúceho úseku hybridu, ktorým už je priradená priemerná výška. V prípade podložky prvého čipu bola priradená priemerná hodnota časti hybridu nachádzajúcej sa medzi prvým a druhým čipom a v prípade posledného medzi piatym a šiestym čipom. Pre lepšiu predstavu vid obr. 5.8.



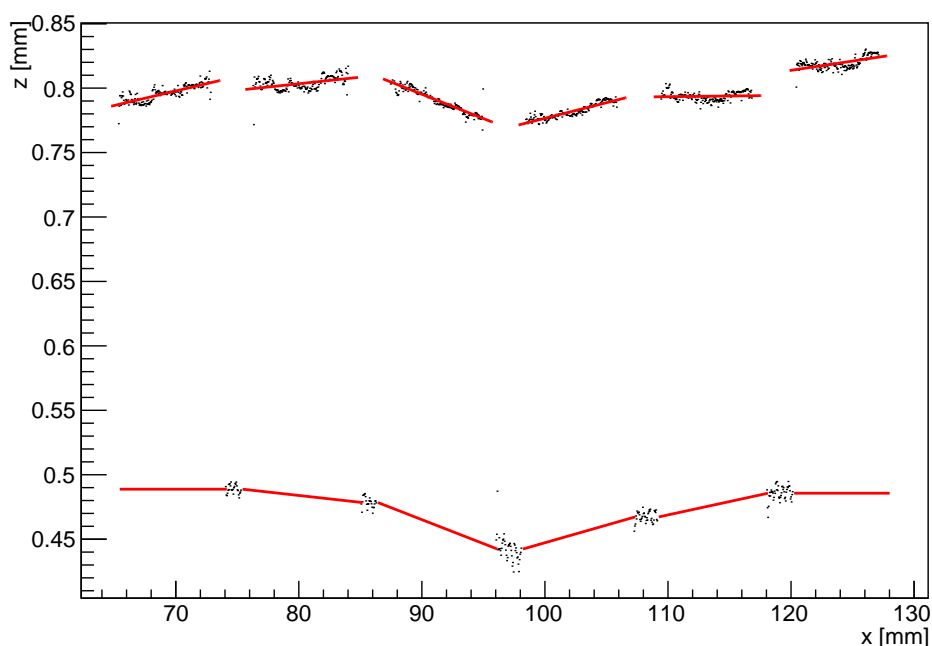
Obr. 5.7: Detail rezu hybridom

Zaujímali sme sa o výšku čipu voči hybridu vo vzdialenosti 1 mm od x -ovej súradnice začiatku a konca daného čipu. Túto vzdialenosť sme volili kvôli tomu, že skenovanie okrajov čipov môže byť jemne zaťažené istým nerovnosťami, pričom v smere bližšie k stredu čipu, by už mala byť výška nameraná presne. Požadovanú výšku sme získali jednoducho - od výšky daného bodu čipu získanej z lineárneho fitu čipu sme odpočítali výšku podložky pre čip v rovnakej x -ovej súradnici.

Výška lepidla v danom bode sa určí tak, že sa od relatívnej výšky čipu odpočíta hrúbka čipu.

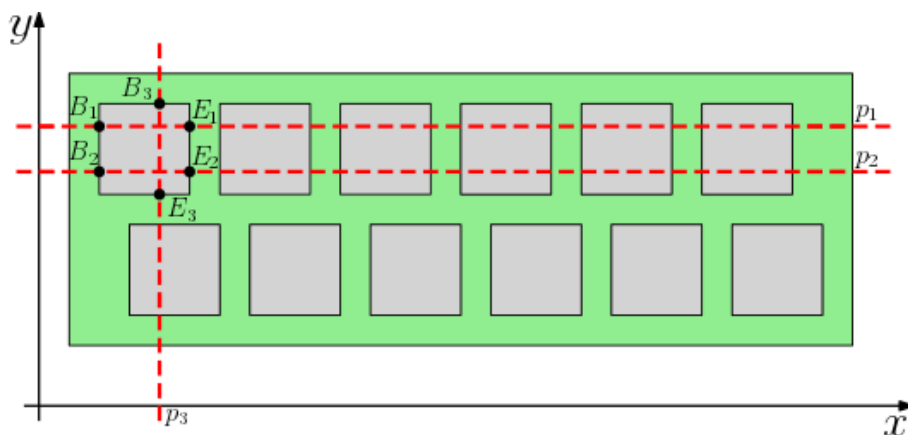
5.2.2 Súradnice rohov čipov

Keďže čipy môžu byť na hybride pootočené voči rovine x - y , tak na určenie súradníc ich rohov sme potrebovali mať každým čipom naskenované dva



Obr. 5.8: Určovanie relatívnej výšky čipov

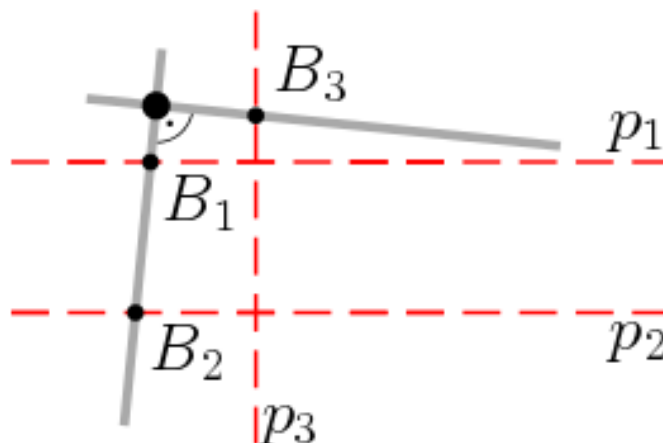
rezy p_1, p_2 rovnobežné s osou x a jeden rez p_3 rovnobežný s osou y , čo je znázornené na obr. 5.9. Z každého rezu sme pomocou programu určili súradnice začiatku a konca čipu na danej priamke. Bod začiatku prvého horného čipu získaného pomocou rezu p_1 značíme B_1 a konca E_1 , podobne B_2, E_2 , resp. B_3, E_3 sú body začiatku a konca prvého horného čipu získané z rezu p_2 , resp. p_3 .



Obr. 5.9: Tri rezy hybridom slúžiace na získanie potrebných informácií o prvom hornom čipe. Rezy p_1 a p_2 sú rovnobežné s osou x a rez p_3 je rovnobežný s osou y . Body $B_1/B_2/B_3$ a body $E_1/E_2/E_3$ sú body začiatkov a koncov čipu získaných z rezov $p_1/p_2/p_3$.

Na dopočítanie napr. ľavého horného rohu sme body B_1 a B_2 spojili priamkou. K tejto priamke sme následne zostrojili kolmicu vedúcu bodom B_3 . Miesto, kde sa tieto dve priamky pretli patrilo rohu čipu. Pri hľadaní ostatných rohov sme postupovali analogicky.

Na dopočítanie relatívnej výšky rohov sme využívali iba rezy p_1, p_2 . Pomocou programu sme určili výšku bodov vzdialených 1 mm od oboch okrajov, pričom sme poznali aj x -ové a y -ové súradnice týchto štyroch bodov. Tieto body sme následne nafitovali rovnicou roviny. Do predpisu tejto rovnice sme potom dosadili x -ové a y -ové súradnice rohov čipov, čím sme získali aj ich relatívnu výšku.



Obr. 5.10: Dopčítanie ľavého horného rohu čipu. Body B_1 a B_2 sa spoja priamkou, ku ktorej sa potom zostrojí kolmica vedúca bodom B_3 . Bod prieniku týchto dvoch priamok predstavuje hľadaný roh.

Týmto spôsobom je možné dopočítať súradnice ktoréhokolvek bodu na čipe.

5.2.3 Náklon čipov

Pri každom čipe sme určovali štyri uhly. Prvý predstavoval natočenie čipu v rovine $x-y$, ktorý sme určili ako uhol natočenia vrchnej hrany čipu od priamky predstavujúcej lineárny fit bodov horných rohov všetkých šiestich čipov.

Uhol naklonenia v rovine $x-z$ bol určený ako uhol medzi priamkou spájajúcou vrchné rohy čipu a priamkou $z=0$. Podobne, natočenie v rovine $y-z$ je popísané uhlom medzi priamkou spájajúcou ľavé dva rohy čipu a priamkou $z=0$.

Posledný uhol predstavuje uhol medzi rovinou čipu a rovinou o rovnici $z=0$.

5.2.4 Opakovateľnosť merania

Na overenie opakovateľnosti merania sme namerali 50 skenov rezu rovnobežného s osou x vedúceho horným radom čipov na hybride s identickými nastaveniami ConoScanu. Hybrid bol počas všetkých meraní pevne prilepený na podložke ConoScanu, aby bola poloha čipov stále rovnaká.

Z výsledkov týchto meraní sme následne vykreslili histogramy x -ových súradníc začiatkov a koncov každého z čipov na danom reze. Po odčítaní x -ovej súradnice začiatku čipu od x -ovej súradnice konca čipu sme získali dĺžku čipu v smere osi x , ktorú sme taktiež vynášali do histogramov.

Po spracovaní nameraných dát pomocou nášho programu sme do histogramov vykresľovali aj z -ové súradnice a relatívne výšky čipov vo vzdialenosti 1 mm

od začiatkov a koncov jednotlivých čipov.

Predpokladali sme, že histogramy v smere osi y budú vyzeráť rovnako ako v smere osi x , preto sme 50 rovnakých skenov merali iba v jednom smere.

5.3 Určovanie chýb merania

5.3.1 Chyba určenia x -ovej a y -ovej súradnice rohu čipu

K dopočítaniu napr. x -ovej súradnice ľavého horného rohu boli využité tri body B_1, B_2, B_3 (viď obr. 5.10) o súradniciach $[x_1, y_1]$, $[x_2, y_2]$ a $[x_3, y_3]$. Body B_1 a B_2 boli spojené priamkou o rovnici

$$y = ax + b,$$

kde

$$a = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}, \quad (5.1)$$

$$b = y_2 - \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} x_2.$$

Rovnica kolmice k priamke spájajúcej body B_1 a B_2 má tvar

$$y = -\frac{1}{a}x + c,$$

Po dosadení súradníc bodu B_3 dostávame

$$c = y_3 + \frac{1}{a} x_3 = y_3 + \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} x_3.$$

Roh dopočítame ako miesto, kde sa tieto dve priamky pretnú. Jeho súradnice sú

$$x = a \frac{c - b}{a^2 + 1},$$

$$y = a^2 \frac{c - b}{a^2 + 1} + b.$$

Po dosadení za a, b, c a upravení dostávame

$$x = \frac{y_3(x_1 - x_2)(y_1 - y_2) + x_3(x_1 - x_2)^2 - y_2(x_1 - x_2)(y_1 - y_2) + x_2(y_1 - y_2)^2}{(y_1 - y_2)^2 + (x_1 - x_2)^2}. \quad (5.2)$$

$$y = \frac{y_3 + \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} x_3 - y_2 + \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} x_2}{1 + \left(\frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2}\right)^2} + y_2 - \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} x_2. \quad (5.3)$$

Chybu určenia rohu x -ovej a y -ovej súradnice môžeme vyjadriť ako

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{\partial x}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial y_i} \sigma_{y_i} \right)^2 \right]}, \quad (5.4)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial y_i} \sigma_{y_i} \right)^2 \right]}, \quad (5.5)$$

pričom súradnice x a y sú rovné vzťahom (5.2) a (5.3). Chyby σ_{x_i} a σ_{y_i} sme určili z histogramov x -ových súradníc začiatkov a koncov čipov.

5.3.2 Chyba určenia relatívnej výšky rohu čipu

Relatívna výška rohu čipu bola určená pomocou lineárneho fitu štyroch bodov ležiacich na čipe o rovnici

$$h = ax + by + c. \quad (5.6)$$

Chyba relatívnej výšky rohu σ_{h_f} získaná fitovaním roviny je daná ako

$$\sigma_{h_f} = \sqrt{(a\sigma_x)^2 + (b\sigma_y)^2 + (x\sigma_a)^2 + (y\sigma_b)^2 + (\sigma_c)^2},$$

pričom $a, b, \sigma_a, \sigma_b, \sigma_c$ určíme z výsledkov fitu.

Do tejto chyby je však potrebné zaradiť aj nepresnosť relatívnych výšok σ_{h_i} štyroch bodov, využitím ktorých sme určili rovnicu roviny. Celková chyba relatívnej výšky je

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma_{h_f}^2 + 4\sigma_{h_i}^2}, \quad (5.7)$$

pričom σ_{h_i} sme určili z histogramu relatívnych výšok čipov.

5.3.3 Chyba určenia veľkosti uhlu náklonu čipu

Chyba uhlu natočenia čipu v rovinách x - y , x - h , y - h

Uhol natočenia čipu α v rovine x - y je možné vyjadriť nasledovne

$$\alpha = \arctg \left| \frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 k_2} \right|,$$

kde k_1 je smernica priamky spájajúcej vrchné dva rohy čipu definovaná rovnako ako parameter a vo vzťahu (5.1) a k_2 je smernica priamky získaná z lineárneho fitu horných rohov čipov.

Chybu určenia veľkosti tohto uhla σ_α vyjadríme ako

$$\sigma_\alpha = \frac{1 + k_1 k_2 + k_2(k_1 - k_2)}{1 + (k_1 - k_2)^2} \sigma_{k_1} \quad (5.8)$$

$$\sigma_{k_1} = \sqrt{\left(\frac{y_B - y_A}{(x_B - x_A)^2} \sigma_{x_A} \right)^2 + \left(\frac{y_B - y_A}{(x_B - x_A)^2} \sigma_{x_B} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{y_A}}{x_B - x_A} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{y_B}}{x_B - x_A} \right)^2},$$

kde indexmi A a B označujeme jednotlivé rohy čipu.

Pri určovaní chýb veľkostí uhlov náklonov čipov v rovinách x - z a y - z sme postupovali rovnako až na to, že v týchto dvoch prípadoch platilo $k_2 = 0$.

Chyba uhlu medzi rovinou čipu a rovinou $z = 0$

Rovina čipu je definovaná rovnicou (5.6). Uhol Ω medzi ňou a rovinou o rovnici $z = 0$ je daný ako

$$\Omega = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + a^2 + b^2}}$$

a jeho chyba

$$\sigma_\Omega = \sqrt{\sigma_{\Omega_f}^2 + 4 \left(\frac{\sigma_{h_i}}{h_i} \Omega \right)^2}, \quad (5.9)$$

pričom h_i sú súradnice štyroch bodov na čipe, pomocou ktorých bola určená rovnicou roviny daného čipu a σ_{h_i} je ich nepresnosť. Pre σ_{Ω_f} , chybu uhlu Ω spôsobenú nepresnosťou fitovania roviny, platí

$$\sigma_{\Omega_f} = \sqrt{\frac{1}{a^2 + b^2} \left(\frac{a\sigma_a}{1 + a^2 + b^2} \right)^2 + \frac{1}{a^2 + b^2} \left(\frac{b\sigma_b}{1 + a^2 + b^2} \right)^2}.$$

6. Vyhodnotenie výsledkov

6.1 Súradnice rohov čipov

V Tabulke 6.1 sú uvedené x -ové a y -ové súradnice rohov všetkých šiestich čipov s ich relatívnymi výškami h . Ako LH je v tejto tabulke označený ľavý horný, PH pravý horný, LD ľavý dolný a ako PD pravý dolný roh čipu.

Chyby súradnice x boli určené pomocou vzťahu (5.4), súradnice y pomocou (5.5) a relatívnej výšky využitím vzťahu (5.7).

Tabulka 6.1: Súradnice rohov čipov

čip	roh	x [mm]	σ_x [mm]	y [mm]	σ_y [mm]	h [mm]	σ_h [mm]
1	LH	65,54	0,06	99,09	0,04	0,28	0,01
	PH	73,11	0,05	98,89	0,07	0,29	0,01
	LD	65,49	0,05	91,79	0,04	0,33	0,01
	PD	72,84	0,05	91,61	0,06	0,34	0,01
2	LH	76,47	0,06	99,04	0,09	0,29	0,01
	PH	83,88	0,06	99,18	0,02	0,30	0,01
	LD	76,63	0,05	91,23	0,09	0,33	0,01
	PD	84,04	0,06	91,38	0,02	0,34	0,01
3	LH	88,38	0,06	99,49	0,09	0,30	0,01
	PH	94,95	0,06	99,43	0,02	0,33	0,01
	LD	88,31	0,05	91,47	0,09	0,34	0,01
	PD	94,88	0,05	91,41	0,02	0,34	0,01
4	LH	98,55	0,06	98,85	0,09	0,29	0,02
	PH	106,10	0,06	98,95	0,02	0,28	0,02
	LD	98,70	0,05	91,31	0,09	0,36	0,02
	PD	105,81	0,05	91,41	0,02	0,36	0,02
5	LH	109,50	0,06	99,14	0,08	0,30	0,01
	PH	117,10	0,06	99,19	0,03	0,30	0,01
	LD	109,66	0,05	91,33	0,08	0,35	0,01
	PD	116,82	0,06	91,39	0,02	0,35	0,01
6	LH	120,48	0,06	99,07	0,08	0,29	0,01
	PH	127,91	0,06	99,22	0,03	0,30	0,01
	LD	120,63	0,05	91,45	0,08	0,30	0,01
	PD	126,09	0,06	91,59	0,03	0,33	0,01

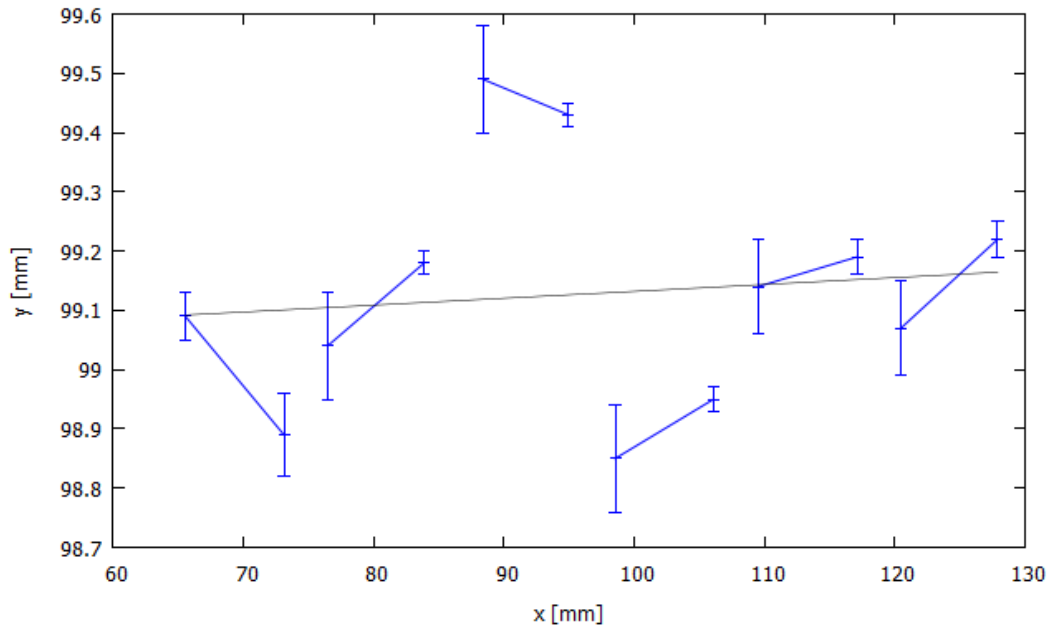
6.2 Náklon čipov

V Tabulke 6.2 sa nachádzajú uhly α natočenia čipov v rovinách x - y , x - h a y - h , pričom h je relatívna výška čipov. V tabulke je tiež uvedený uhol Ω , predstavujúci uhol medzi rovinou čipu a rovinou o rovnici $z=0$. Chyby uhlov α boli určované pomocou vzťahu (5.8) a uhlu Ω pomocou (5.9).

Tabuľka 6.2: Náklon čipov

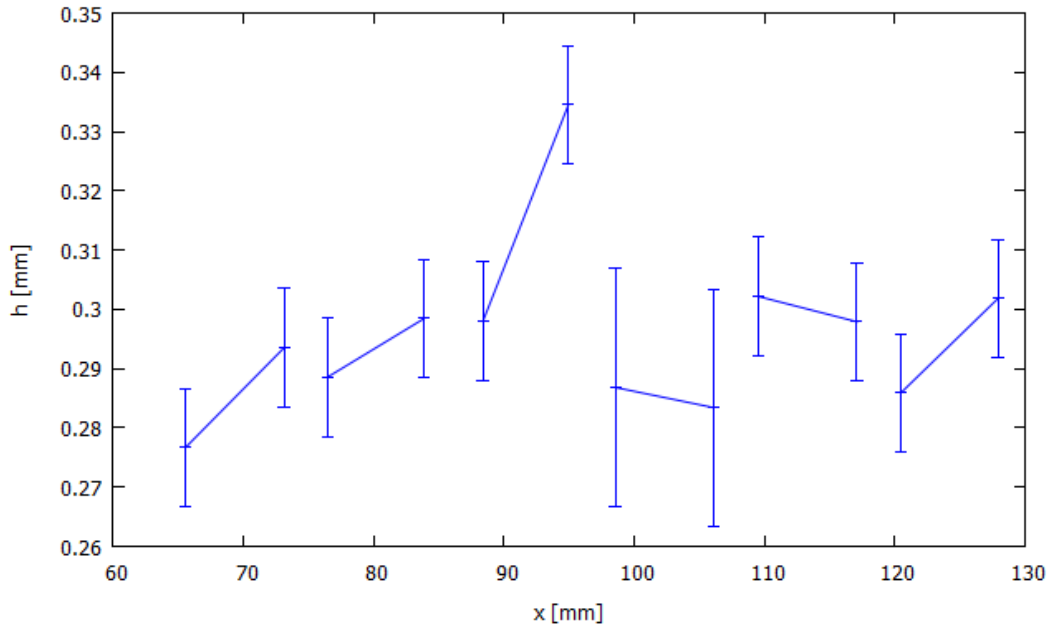
čip	$x - y$		$x - h$		$y - h$		Ω	$\sigma_\Omega [^\circ]$
	$\alpha [^\circ]$	$\sigma_\alpha [^\circ]$	$\alpha [^\circ]$	$\sigma_\alpha [^\circ]$	$\alpha [^\circ]$	$\sigma_\alpha [^\circ]$		
1	1,485	0,006	0,127	0,002	0,385	0,002	0,409	0,003
2	1,054	0,010	0,076	0,012	0,330	0,012	0,341	0,002
3	0,495	0,010	0,319	0,001	0,306	0,001	0,442	0,003
4	0,731	0,010	0,026	0,003	0,565	0,003	0,565	0,004
5	0,349	0,009	0,032	0,002	0,383	0,002	0,385	0,002
6	1,128	0,009	0,122	0,001	0,295	0,001	0,319	0,002

Na obr. 6.1 sú zakreslené horné hrany čipov v rovine $x-y$. Rohy všetkých čipov sú nafiťované lineárne. Uhly natočenia čipov v tomto grafe sú skreslené, pretože stupnice na osiach x a y nie sú rovnaké.



Obr. 6.1: Natočenie čipov v rovine $x-y$. Uhly natočenia sú skreslené, pretože stupnice na osiach nie sú rovnaké. Sivá čiara predstavuje lineárny fit rohov všetkých šiestich čipov.

Umiestnenie čipov v rovine $x-h$ je možné vidieť na obr. 6.2.



Obr. 6.2: Umiestnenie čipov v rovine $x-h$

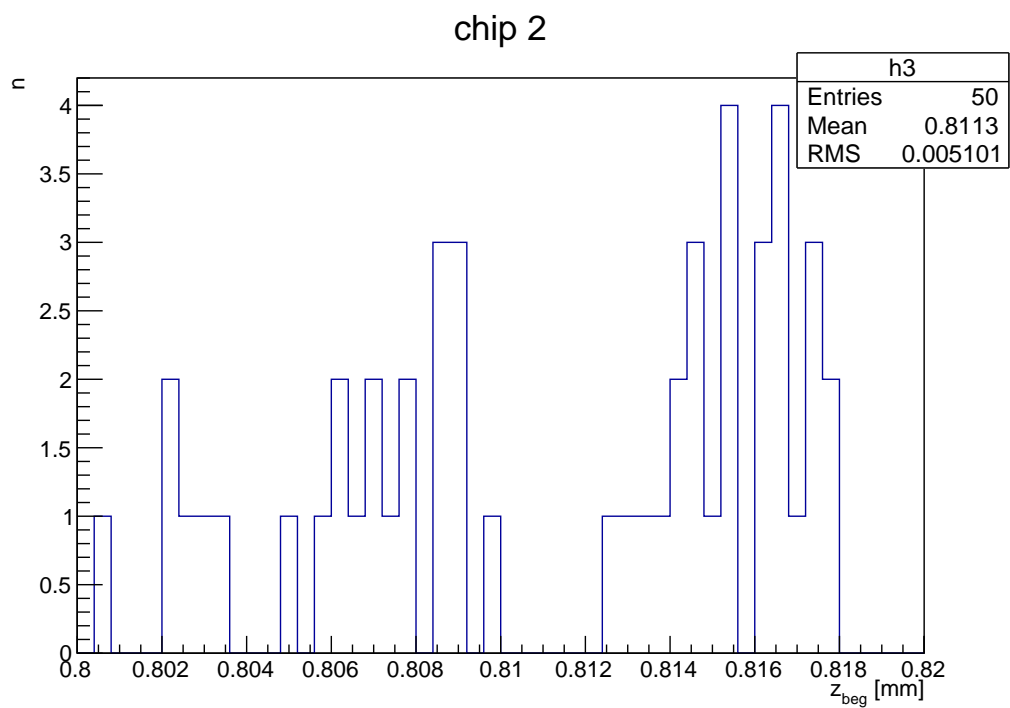
6.3 Opakovateľnosť merania

Na obr. 6.3 je možné vidieť histogram z -ových súradníc druhého čipu vo vzdialenosti 1 mm od x -ovej súradnice začiatku čipu.

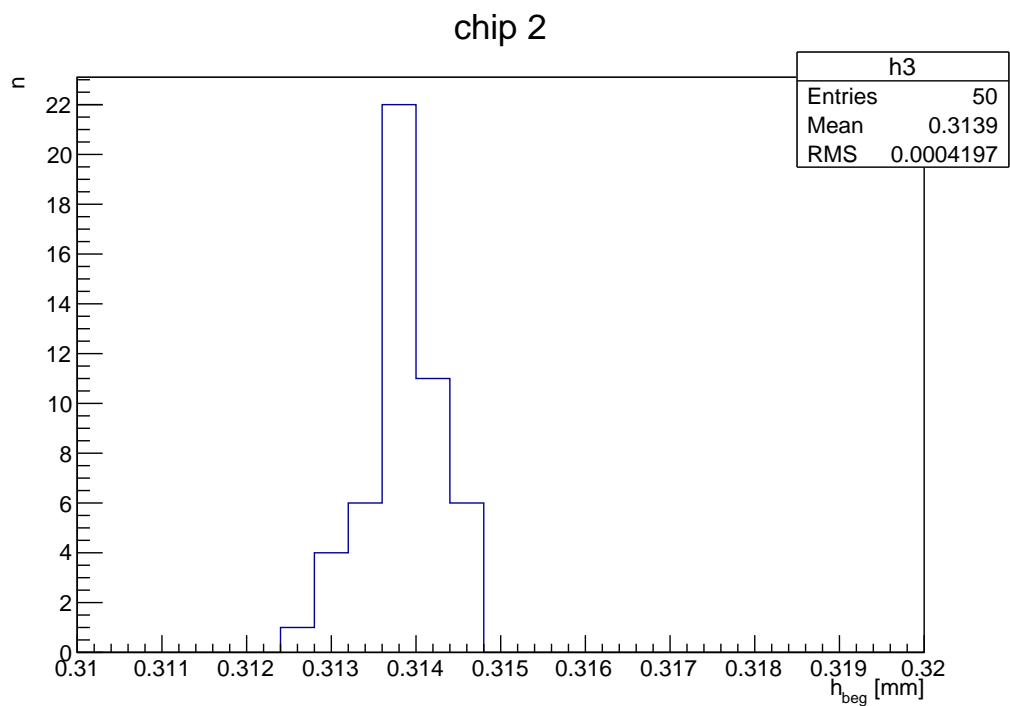
Na obr. 6.4 sa nachádza histogram relatívnych výšok druhého čipu vo vzdialenosti 1 mm od x -ovej súradnice začiatku čipu.

Na obr. 6.5 je zobrazený histogram x -ových súradníc začiatku druhého čipu pri kroku skenovania $50 \mu\text{m}$ a na obr. 6.6 pri kroku skenovania $10 \mu\text{m}$.

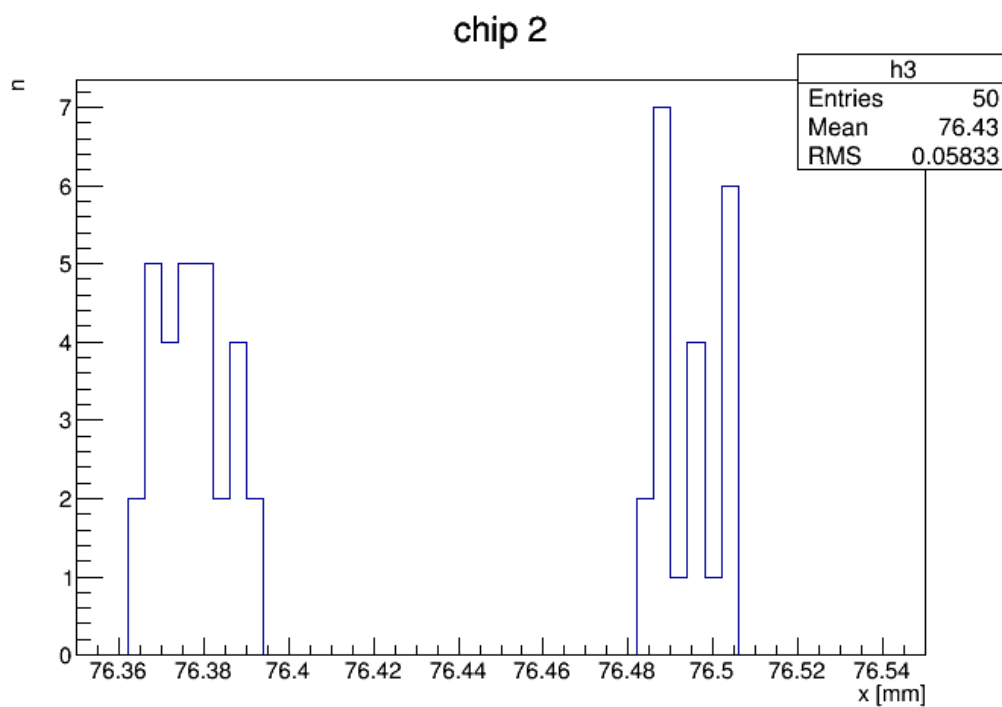
Obr. 6.7 znázorňuje histogram dĺžok druhého čipu pri kroku skenovania $50 \mu\text{m}$ a obr. 6.8 pri kroku $10 \mu\text{m}$.



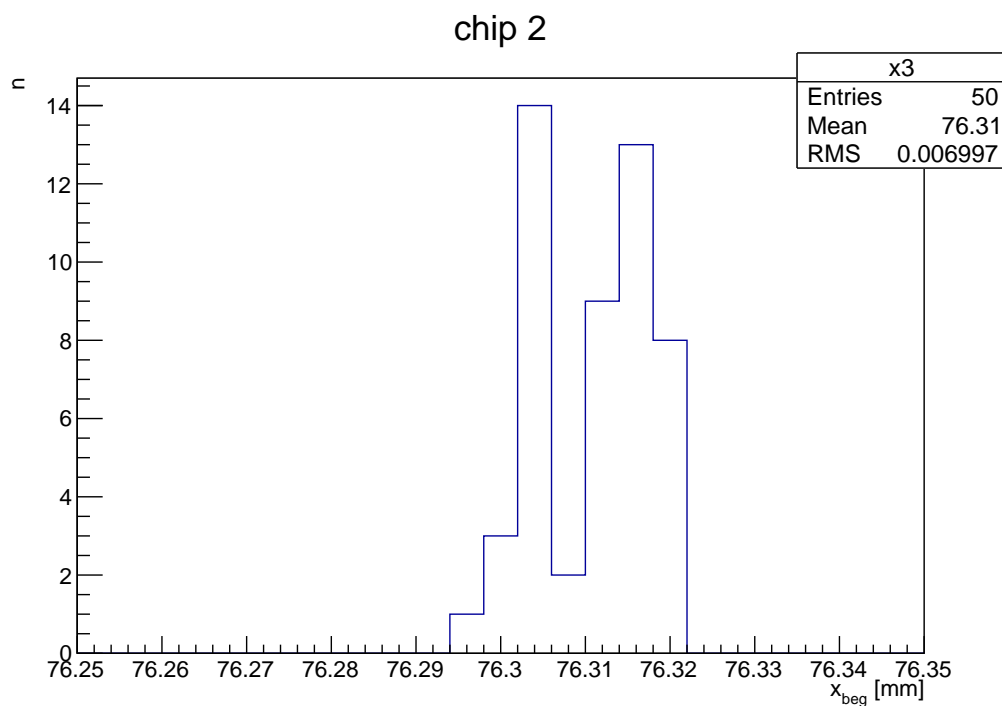
Obr. 6.3: Histogram z -ových súradníc druhého čipu vo vzdialenosti 1 mm od začiatku



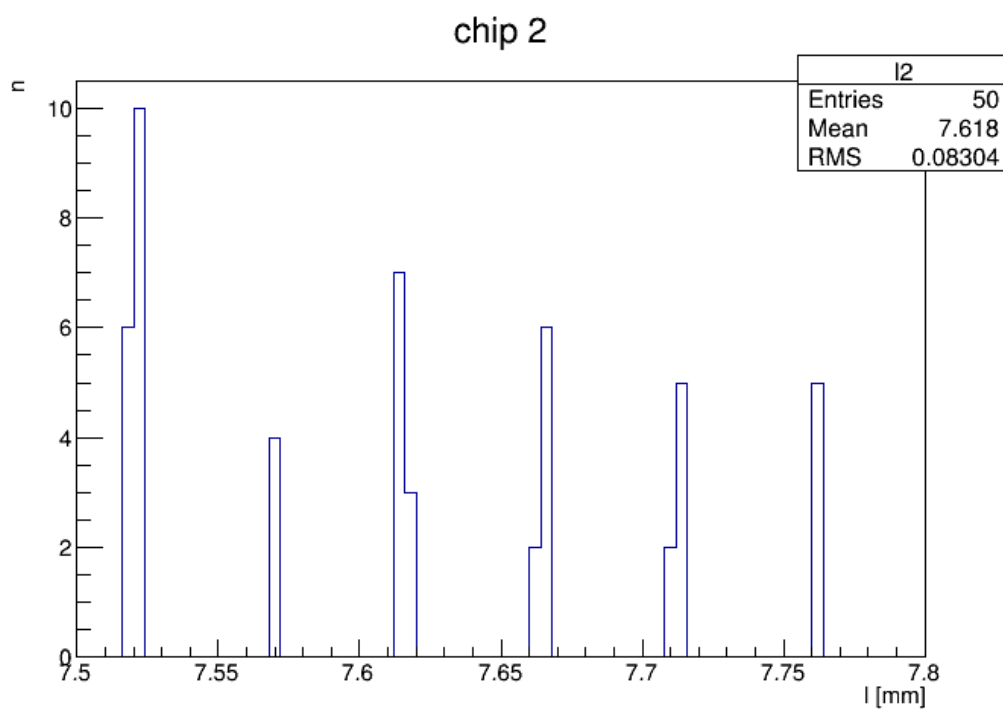
Obr. 6.4: Histogram relatívnych výšok druhého čipu vo vzdialenosti 1 mm od začiatku



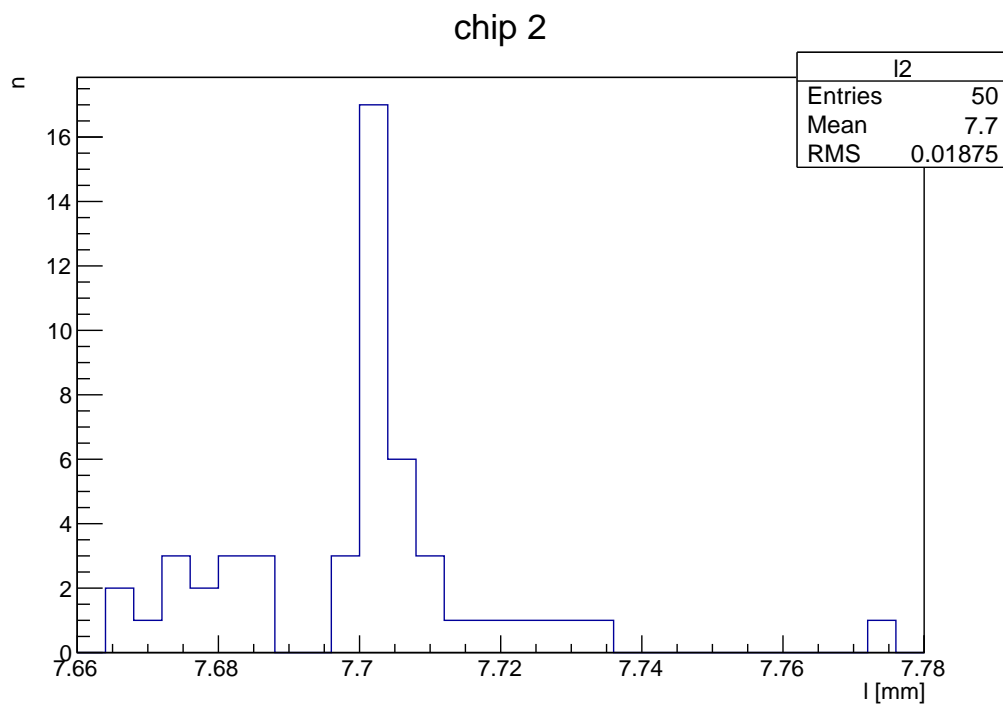
Obr. 6.5: Histogram x -ových súradníc začiatku druhého čipu pri kroku skenovania $50 \mu\text{m}$



Obr. 6.6: Histogram x -ových súradníc začiatku druhého čipu pri kroku skenovania $10 \mu\text{m}$



Obr. 6.7: Histogram dĺžok druhého čipu pri kroku skenovania $50 \mu\text{m}$



Obr. 6.8: Histogram dĺžok druhého čipu pri kroku skenovania $10 \mu\text{m}$

7. Diskusia

7.1 Diskusia výsledkov

Vo výsledkoch meraní sú uvedené ako ukážka iba histogramy týkajúce sa druhého čipu. Histogramy ostatných čipov vyzerajú veľmi podobne.

Porovnaním histogramov na obr. 6.3 a na obr. 6.4, na ktorých je z -ová súradnica čipu a relatívna výška čipu v tom istom mieste, je možné si všimnúť, že pri relatívnej výške čipu sa na histograme nachádza jeden pík pripomínajúci gaussovské rozdelenie, čo v prípade histogramu na obr. 6.3 rozhodne neplatí. V prípade histogramu relatívnych výšok je stredná kvadratická odchýlka (v histograme označená ako *RMS*) o jeden rád menšia než v prípade histogramu z -ových súradníc.

Skenovania, na základe ktorých sme vyhodnocovali súradnice rohov čipov, prebiehali pri posuve skenovacej hlavice ConoScanu v smere osi x aj v smere osi y o $50\ \mu\text{m}$. Predpokladali sme však, že pri menšom kroku skenovania by sa nám podarilo dosiahnuť lepšiu presnosť výsledkov. Pokúsili sme sa to overiť ďalšími 50 identickými skenovaniami rezu hybridom, tentokrát pri kroku $10\ \mu\text{m}$, pričom zvyšné nastavenia ostali rovnaké ako pri kroku $50\ \mu\text{m}$. Na základe porovnania strednej kvadratickej odchýlky v histogramoch na obr. 6.5 a na obr. 6.6, ktorá sa líši takmer o jeden rád môžeme považovať náš predpoklad za naplnený.

Skutočnosť, že zvolením nižšieho kroku skenovania, je možné dosiahnuť lepšiu presnosť, nám môže potvrdiť aj porovnanie ďalších dvoch histogramov na obr. 6.7 a na obr. 6.8. V prípade týchto dvoch histogramov nám o lepších výsledkoch nehovorí len stredná kvadratická odchýlka, ale aj fakt, že pri kroku $50\ \mu\text{m}$ sa v histograme objavili píky porovnateľných veľkostí v rozstupoch odpovedajúcich kroku skenovania, čo pri dĺžke čipu nedáva z fyzikálneho hľadiska zmysel. Na histograme dĺžok čipu pri kroku $10\ \mu\text{m}$ sa už objavuje iba jeden výrazný pík.

Chyby určenia x -ových a y -ových súradníc rohov čipov sa pohybujú v rozmedzí od 20 do $90\ \mu\text{m}$. V prípade relatívnej výšky rohov majú chyby ich určenia veľkosť do $20\ \mu\text{m}$. Tieto výsledky sa ešte pohybujú v rámci hornej hranice požiadaviek detektoru ATLAS na presnosť zostavenia detekčného modulu, kde v prípade súradníc x a y je povolená odchýlka $100\ \mu\text{m}$ a v smere osi z $20\ \mu\text{m}$.

V histograme x -ových súradníc pri kroku $50\ \mu\text{m}$ na obr. 6.5 sa nachádzajú dve samostatné skupiny píkov o porovnateľnej veľkosti. Tento výsledok je pravdepodobne spôsobený posunom skenovacej hlavice ConoScanu v smere osi x v priebehu meraní. Tieto chyby sa odzrkadlili v strednej kvadratickej odchýlke súradníc začiatku a konca čipu, no aj napriek ním nepresiahla chyba určenia súradníc požadované presnosti ATLASu.

7.2 Dosiahnutie lepších presností

Naše merania prebiehali pri kroku skenovania o veľkosti $50\ \mu\text{m}$ v smere osí x a y . Jednou z možností ako dosiahnuť lepšiu presnosť výsledkov je zvoliť skenovanie pri menšom kroku, nakoľko minimálny krok skenovania ConoScanom je $1,5\ \mu\text{m}$. Ako bolo overené, v histogramoch dosiahneme menšiu strednú kvadratickú odchýlku, ktorá figurovala vo väčšine výpočtoch chýb.

Spolupracujúca ATLAS skupina na FZÚ AV ČR má vo svojom vybavení inú metrologickú stanicu, SmartScope CNC 500, schopnú merať s oveľa lepšími presnosťami. Medzi jej ďalšie výhody patrí to, že dokáže vyhľadať referenčné body a určovať súradnice voči nim.

Aj keď naše merania prebiehali s prístrojom ConoScan 4000, ktorý nie je tak presný ako SmartScope CNC 500, podarilo sa nám dosiahnuť postačujúce presnosti. Tie bolo ovplyvnené najmä naším zvoleným pracovným postupom. Určovanie výšky relatívne voči hybridu nám umožnilo získať o jeden rád nižšiu chybu pri meraní výšky bodu nachádzajúceho sa na skenovanom reze, než pri určovaní výšky voči referenčnej sústave ConoScanu. Pomohlo nám to aj eliminovať nepresnosti spôsobené náklonom podložky ConoScanu a zosunom jeho skenovacej hlavice v smere osi z .

Záver

Cieľom tejto práce bolo podieľať sa na overovaní presnosti montáže kremíkových detektorov pre modernizáciu dráhového detektoru ATLAS a na stanovení optimálneho postupu tohto merania a vyhodnotenie výsledkov.

Oboznámili sme sa s motiváciou zvolených pracovných postupov spočívajúcou v zosuve skenovacej hlavice ConoScanu v priebehu meraní v smere osi z a v náklone podložky ConoScanu, voči ktorej tento prístroj určuje súradnice naskenovaných bodov. Na základe týchto skutočností sme sa rozhodli určovať z -ovú súradnicu čipov relatívne voči hybridu.

Museli sme sa vysporiadať aj s absenciou referenčných bodov na nami skenovanom hybride, voči ktorým sú uvádzané požiadavky na presnosť zostavenia detekčného modulu. Preto sme sa rozhodli určovať súradnice rohov každého z čipov, avšak naším postupom je možné dopočítať súradnice ktoréhokolvek bodu na čipe.

Na overenie opakovateľnosti merania prístrojom ConoScan sme naskenovali 50 identických meraní rezu hybridom, z ktorých spracované výsledky sme vy niesli do histogramov. V nich bolo možné všimnúť si napríklad to, že určovanie výšky čipu relatívne voči hybridu vedie k lepším výsledkom, než pri automatickom určovaní z -ovej súradnice voči podložke ConoScanu.

Presnosti určovania súradníc rohov čipov sa pohybujú v rámci hornej hranice požiadaviek detektoru ATLAS na presnosť zostavenia detekčných modulov. Stále je tu však priestor na vylepšovanie pracovného postupu, nakoľko sme overili, že pri nižšom zvolenom kroku skenovania ConoScanu pozdĺž osí x a y , je možné dosiahnuť lepšie presnosti.

V rámci tejto práce sme vyvinuli metódu overovania presnosti zostavenia detekčných modulov a na prototyp hybridu stanovili dosiahnuté presnosti merania, ktoré sú v súlade s požiadavkami experimentu ATLAS. Tým môžeme považovať stanovené ciele za úspešne naplnené.

Zoznam použitej literatúry

- [1] G. Lutz. *Semiconductor Radiation Detectors*. Springer, Berlin, 1999.
- [2] CMS: Silicon Pixels. <http://cms.web.cern.ch/news/silicon-pixels>. [cit. 2018-03-18].
- [3] ATLAS: Photo Collection. <https://atlas.cern/resources/multimedia/detector>. [cit. 2018-03-28].
- [4] ATLAS: The Inner Detector. <https://atlas.cern/discover/detector/inner-detector>. [cit. 2018-03-28].
- [5] The ATLAS Collaboration. Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Strip Detector. <https://cds.cern.ch/record/2257755/files/ATLAS-TDR-025.pdf>. [cit. 2018-04-04].
- [6] Z. Doležal. Polovodičové detektory v jaderné a subjaderné fyzice. http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~dolezal/teach/semicon/semi_p.pdf. [cit. 2018-04-19].
- [7] ConoScan 4000. <http://www.optimet.com/conoscan4000.php>. [cit. 2018-04-24].
- [8] L. Janitorová. Měření mechanických vlastností modulů vnitřního detektoru ATLAS v CERN. <http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/kodys/works/uceni/cz/SFGJanitorova2017.pdf>. [cit. 2018-04-25].
- [9] L. Janitorová. Měření mechanických vlastností modulů vnitřního detektoru ATLAS v CERN. <http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/kodys/works/uceni/cz/SFGJanitorova.pdf>. [cit. 2018-04-25].
- [10] ROOT. <https://root.cern.ch/>.

Zoznam obrázkov

1.1	Nevlastný polovodič typu n (vľavo) a polovodič typu p (vpravo), prevzaté z [1]	4
1.2	Hybridný pixelový detektor, prevzaté z [2]	6
2.1	Schéma experimentu ATLAS: vnútorný detektor (žltá farba), elektromagnetický kalorimeter (zelená), hadrónový kalorimeter (červená), mionový spektrometer (modrá), prevzaté z [3]	7
2.2	Schéma vnútorného detektoru experimentu ATLAS, prevzaté z [4]	8
3.1	Náčrt prierezu detekčného modulu na podpornej štruktúre, prevzaté z [5].	10
3.2	Schéma usporiadania podpornej štruktúry: petal (hore), stave (dole). Vyznačené sú na nej moduly, hybridy a EoS (End of Substructure = karta zabezpečujúca rozhranie). [5]	11
3.3	Označenie osí modulu. Os x je kolmá na stripy, os y je rovnobežná so stripmi a os z smeruje von z modulu. [5]	11
3.4	Vľavo: referenčné značky na hybridoch na meranie x -ovej a y -ovej súradnice nalepených čipov. Vpravo: päť značiek na každej podložke pre čip určených k výpočtu výšky lepidla. [5]	12
3.5	Trajektória častice v oblasti magnetického poľa B o dĺžke L	13
4.1	Prístroj ConoScan 4000, prevzaté z [7]	14
5.1	Meraný hybrid	16
5.2	Rez hybridom naskenovaný pomocou prístroja ConoScan	16
5.3	Separácia nameraných dát rezu hybridom na čipy ($z \approx 0,8$ mm) a hybrid medzi nimi ($z \approx 0,5$ mm)	17
5.4	Odlíšne dáta namerané pri rovnakých nastaveniach ConoScanu	17
5.5	Rez podložky ConoScanu pozdĺž osi x	18
5.6	Rez podložky ConoScanu pozdĺž osi y	18
5.7	Detail rezu hybridom	19
5.8	Určovanie relatívnej výšky čipov	20
5.9	Tri rezy hybridom slúžiace na získanie potrebných informácií o prvom hornom čipe. Rezy p_1 a p_2 sú rovnobežné s osou x a rez p_3 je rovnobežný s osou y . Body $B_1/B_2/B_3$ a body $E_1/E_2/E_3$ sú body začiatkov a koncov čipu získaných z rezov $p_1/p_2/p_3$	20
5.10	Dopočítanie ľavého horného rohu čipu. Body B_1 a B_2 sa spoja priamkou, ku ktorej sa potom zostrojí kolmica vedúca bodom B_3 . Bod prieniku týchto dvoch priamok predstavuje hľadaný roh.	21
6.1	Natočenie čipov v rovine x - y . Uhly natočenia sú skreslené, pretože stupnice na osiach nie sú rovnaké. Sivá čiara predstavuje lineárny fit rohov všetkých šiestich čipov.	26
6.2	Umiestnenie čipov v rovine x - h	27
6.3	Histogram z -ových súradníc druhého čipu vo vzdialenosti 1 mm od začiatku	28

6.4	Histogram relatívnych výšok druhého čipu vo vzdialenosti 1 mm od začiatku	28
6.5	Histogram x -ových súradníc začiatku druhého čipu pri kroku skenovania $50 \mu\text{m}$	29
6.6	Histogram x -ových súradníc začiatku druhého čipu pri kroku skenovania $10 \mu\text{m}$	29
6.7	Histogram dĺžok druhého čipu pri kroku skenovania $50 \mu\text{m}$	30
6.8	Histogram dĺžok druhého čipu pri kroku skenovania $10 \mu\text{m}$	30