

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Polovodičové detektory ionizujícího záření

vedoucí práce: Ing. Václav Kraus

autor: Petr Štěpánek

2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr ŠTĚPÁNEK**
Osobní číslo: **E12B0083P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika**
Název tématu: **Polovodičové detektory ionizujícího záření**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Prostudujte a detailně zpracujte princip detekce ionizujícího záření v polovodičích.
2. Provedte analýzu polovodičových detektorů používaných v současnosti.
3. Provedte analýzu výrobců polovodičových detektorů ionizujícího záření.
4. Srovnajte vlastnosti a použití jednotlivých detektorů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Kraus**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

V práci nalezneme popis ionizujícího záření a jeho druhů. Další část se zabývá polovodičovými detektory. Je zde podrobně rozebrán princip funkce a různé druhy detektorů. Následně jsou uvedeni přední výrobci detektorů. V závěru jsou srovnávány druhy polovodičových detektorů a možnosti polohové detekce částic.

Klíčová slova

Ionizující záření, detektory ionizujícího záření, pixelové detektory, stripové detektory, driftové detektory, výrobci polovodičových detektorů, polohová detekce, použití detektorů

Abstract

In this thesis we find description of ionizing radiation and its species. In the first chapter we find description of ionizing radiation and its species. The next part deals with semiconductor detectors. There is detailed analysis of the operating principles and different types of detectors. The following are described leading manufacturer of detectors. The final chapter compares the types of semiconductor detectors and positional detection of particles.

Key words

Ionizing radiation, ionizing radiation detectors, pixel detectors, strip detectors, drift detectors, manufactures of semiconductor detectors, positional detection, typical use of detectors

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 1.6.2013

Petr Štěpánek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Václavu Krausovi za cenné rady, připomínky a vedení celé práce.

Obsah

Úvod	9
1 Ionizující záření	10
1.1 Druhy ionizujícího záření	10
1.1.1 Záření alfa	10
1.1.2 Záření beta	11
1.1.3 Záření gama	12
1.2 Zdroje ionizujícího záření	12
1.2.1 Přírodní zdroje ionizujícího záření	12
1.2.2 Umělé zdroje ionizujícího záření	13
1.3 Ionizace	13
1.4 Účinky ionizujícího záření na člověka	14
2 Polovodičové detektory ionizujícího záření	15
2.1 Rozdělení detektorů	15
2.1.1 Křemíkové detektory	16
2.1.2 Germaniové detektory	17
2.2 Pixelové detektory	17
2.3 Stripové detektory	18
2.4 Driftové detektory	19
2.5 $\Delta E/\Delta X$ detektory	20
3 Výrobci polovodičových detektorů	21
3.1 Současní výrobci polovodičových detektorů	21
3.2 Srovnání detektorů	22
3.2.1 Křemíkové detektory	23
3.2.2 Germaniové detektory	23
3.2.3 Stripové detektory	23
3.2.4 Pixelové detektory	24
3.2.5 Pinové detektory	24
3.2.6 Driftové detektory	25
4 Konkrétní příklady využití polovodičových detektorů	26
4.1 Použití pixelových detektorů	26
4.2 Použití driftových detektorů	28
4.3 Srovnání polovodičových detektorů	29
5 Určení polohy částice pomocí pixelového detektoru	30
5.1 Teoretický rozbor	30
5.2 Určení polohy částice pomocí stripových detektorů	31
5.3 Aproximace clusteru pixelového detektoru pomocí Gaussovy funkce	32
Závěr	35
Použitá literatura	36
Přílohy	37

Úvod

S nástupem rozvoje techniky začal člověk využívat různých zdrojů energie. Jedním z nejnovějších způsobů získávání energie je jaderná reakce. Využívá se jí v mnoha oborech lidské činnosti od výroby elektrické energie v elektrárnách až po lékařské využití v medicíně. Při těchto jevech vznikají různé druhy záření. Ionizující záření může být člověku k užítku, ale také je třeba se před nimi chránit, měřit a odhalovat jejich přítomnost. K jeho měření se využívají specializovaná elektronická zařízení – detektory. Detektorů existuje mnoho druhů a jsou vhodné pro různé aplikace. V minulosti, ale i v současnosti, se využívá například Geigerův-Müllerových počítáčů. Na rozdíl od nich polovodičové detektory poskytují výrazně lepší integraci s další měřicí elektronikou.

Ionizující záření je výrazně škodlivé pro všechny živé organismy. Pokud je člověk vystaven ionizujícímu záření, dochází k nevratnému poškození buněk. Tyto nepříznivé účinky rostou s délkou expozice. Proto je nutné hodnoty obdržených dávek pečlivě sledovat a vyhodnocovat například u zaměstnanců jaderných elektráren. Detekce ionizujícího záření však nemusí sloužit pouze k ochraně zdraví. V současné době existuje několik vědeckých experimentů, ve kterých hraje detekce ionizujícího záření důležitou roli. Jako jeden z nich můžeme jmenovat například LHC – největší urychlovač částic na světě. Jeho úkolem je produkce srážek částic při rychlostech blízkých rychlosti světla. Při těchto srážkách vzniká ionizující záření, které je měřeno několika druhy polovodičových detektorů. Výsledky měření odhalují dosud neznámé stránky vesmíru.

V této bakalářské práci se zaměřím na různé druhy polovodičových detektorů ionizujícího záření a podstatu jejich fungování. Popíši různé druhy ionizujícího záření a jejich možné negativní účinky na lidský organismus. V dalších kapitolách zmapuji výrobce těchto polovodičových součástek a porovnáám parametry jejich výrobků. V poslední části práce se budu zabývat polohovou detekcí částic pomocí pixelových detektorů.

1 Ionizující záření

Ionizující záření je okem neviditelné. Jeho kvanta mají dostatečnou energii k ionizaci atomů ozářené látky, kterou toto záření prochází. Ionizující záření tvoří částice o dostatečné kinetické energii, která stačí na odtržení elektronů v ionizované látce. Proces ionizace můžeme rozdělit na dva druhy – přímo ionizující záření a nepřímo ionizující záření. Přímě ionizující záření tvoří nabitě částice s dostatečnou energií pro vyvolání ionizace. Nepřímě ionizující záření je tvořeno nenabitými částicemi. Ty při interakcích s prostředím uvolňují částice, které látku ionizují.

Zdroje ionizujícího záření můžeme rozdělit na přírodní a umělé. Mezi přírodní zdroje řadíme kosmické záření a přírodní izotopy, které se běžně vyskytují v zemské kůře. Ty při svém rozpadu vyzařují ionizující záření. Mezi umělé zdroje můžeme zařadit veškeré zdroje vytvořené člověkem jako urychlovače a jaderné reaktory. Mezi další specializované využití patří nukleární medicína, kde se používají různé druhy radioizotopů pro diagnostiku chorob a jejich léčbu.

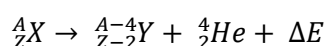
1.1 Druhy ionizujícího záření

Mimo dělení ionizujícího záření podle jeho zdrojů jej lze rozdělit podle způsobu rozpadu jádra a druhu částice, které při tomto procesu emitují:

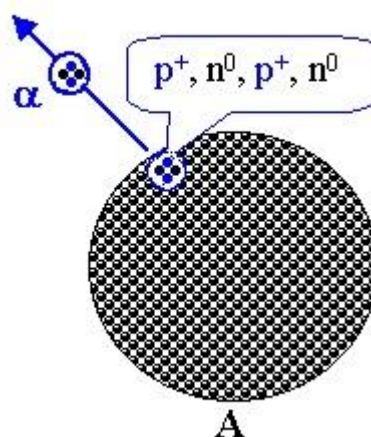
1.1.1 Záření alfa

Jedná se o proud α částic. Jednu částici α tvoří dva protony a dva neutrony, které opustili jádro radionuklidu. Tím vznikne nový prvek, který je od původního posunut v periodické tabulce prvků o dvě místa vlevo. Záření α je nejslabší druh ionizujícího záření. Vlastností α částice je nízká pronikavost a snadno je lze odstínit. Záření α nelze kvůli své malé pronikavosti použít pro diagnostiku nebo k terapii [1]. Tento druh ionizujícího záření objevil v roce 1896 Henri Becquerel.

Radioaktivní přeměna alfa částice představuje přeměnu izotopu těžkého prvku doprovázenou emisí částice alfa a uvolnění energie odpovídající hmotnostnímu úbytku systému. Následující rovnice představuje obecný popis této přeměny:



X a Y jsou jádra izotopů před a po přeměně alfa. ΔE je energetický výtěžek z jedné přeměny ve formě kinetické energie částic.

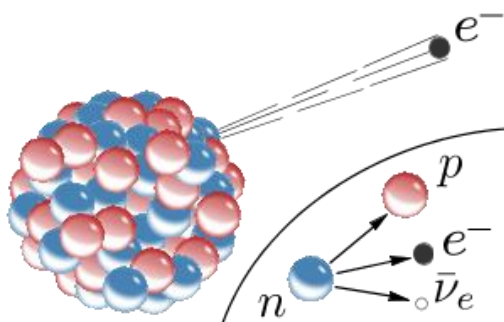


obr. č. 1 vznik záření alfa

1.1.2 Záření beta

Záření β je tvořeno proudem β částic tzv. fermionů. Fermiony jsou částice hmoty, které mají poločíselný spin ($1/2, 3/2, \dots$) a nesou kladný nebo záporný elektrický náboj. Při radioaktivní přeměně β se nemění nukleonové číslo jádra A . Jejím prostřednictvím může jádro s nadbytkem neutronů změnit poměr Z/A a tím dosáhnout větší stability. Základním rysem všech β přeměn je emise elektronového neutrina a uvolnění energie odpovídající hmotnostnímu úbytku systému. Při přeměně beta minus dochází k emisi elektronu. V případě přeměny beta plus dochází k emisi pozitronu.

Tyto částice jsou oproti α záření pronikavější a tak je náročnější i jejich stínění. Pronikavost je větší díky rychlejšímu pohybu částic, vyšší než u alfa záření a tak toto záření relativně dobře proniká materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou [2].



obr. č. 2 vznik záření beta

1.1.3 Záření gama

Záření gama má velmi vysokou energii a nemá žádný elektrický náboj, tudíž jeho šíření není ovlivněno elektromagnetickým polem. Gama záření může vznikat společně se zářeními alfa nebo beta při radioaktivním rozpadu jader. Pokud jádro vyzáří částici α nebo β tak se nové jádro může ocitnout v excitovaném stavu. Gama záření vzniká v jádře atomů při změně energetického stavu jádra. Při přeměně do základního energetického stavu se jádro zbaví energie emisí gama záření.

Ke stínění gama záření je pro jeho velkou energii potřeba velké masy stínícího materiálu. Důležitou fyzikální veličinou je polotloušťka. Ta udává sílu materiálu, který je schopen snížit radiační zatížení na polovinu. Pro gama záření to je například 1 cm olova nebo 6 cm betonu.

Gama záření se používá v rozličných oborech například v medicíně. Díky vysoké energii je účinné při hubení bakterií, proto se využívá ke sterilizaci lékařských nástrojů.

1.2 Zdroje ionizujícího záření

Jak je popsáno výše, zdroje ionizujícího záření můžeme rozdělit na přírodní a umělé. Oba tyto druhy záření vznikají z odlišných příčin.

1.2.1 Přírodní zdroje ionizujícího záření

Kosmické záření je proud energetických částic, které pocházejí z kosmického prostoru. Část kosmického záření pochází ze Slunce, ale částice s největší energií pocházejí z explozí supernov. Jedná se především o protony a jádra hélia. Kosmické záření dává příspěvek k efektivní dávce, kterou člověk obdrží za rok, okolo 380 μSv . Efektivní dávka je součtem dávek, které obdržely jednotlivé orgány.

Další radiační zátěž je způsobena přírodními radionuklidy v zemské kůře. Jejich rozložení není na různých místech Země stejné. To je způsobeno různými geologickými procesy. Na Zemi se vyskytují zejména radionuklidy s poločasem rozpadu delším než 10^8 let. Poločas rozpadu je doba, za kterou se přemění polovina celkového počtu jader ve vzorku. Mezi tyto prvky patří zejména izotopy uranu ^{238}U a ^{235}U . Přírodní radionuklidy vytvářejí pro člověka relativně malou radiační zátěž.

Největším přírodním zdrojem ionizujícího záření na Zemi je plyn radon. Je to bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu. Vzniká při radioaktivním rozpadu rádia a uranu. V atmosféře je koncentrace radonu velmi nízká, téměř neměřitelná. Nejčastěji se nachází ve vývěrech podzemních vod. V malém množství také vyvěrá z podloží.

1.2.2 Umělé zdroje ionizujícího záření

Umělé zdroje ionizujícího záření můžeme rozdělit do pěti kategorií: nevýznamné zdroje (např. drobné uzavřené etalony), drobné zdroje (silnější uzavřené zářiče a nízké aktivity), jednoduché zdroje (zařízení pro rentgenovou diagnostiku a defektoskopická zařízení), významné zdroje (uzavřené zářiče pro radioterapii, urychlovače, vysoce aktivní otevřené zářiče) a nakonec velmi významné zdroje (jaderné reaktory nebo zařízení pro výrobu radionuklidů) [3].

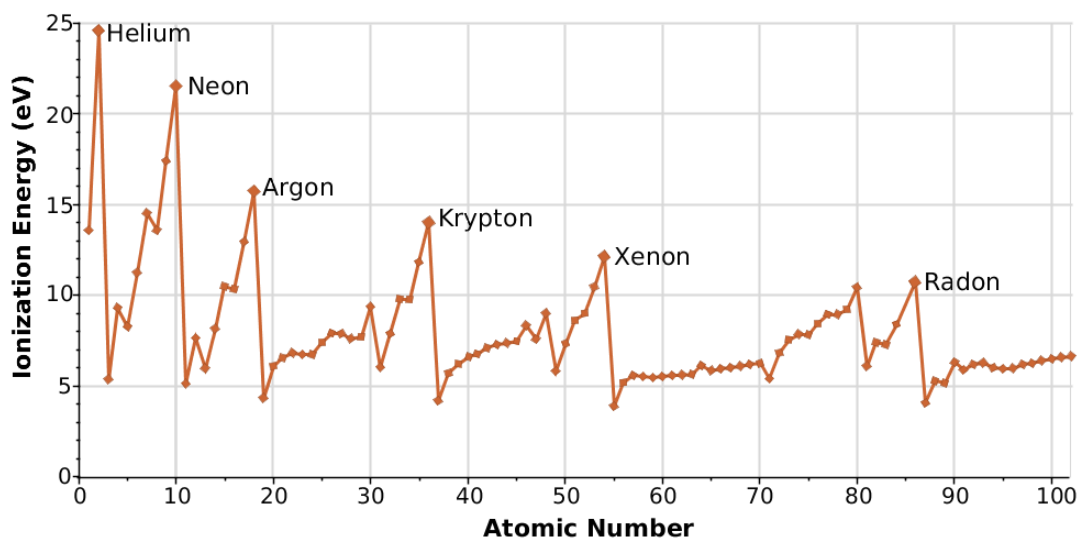
Jaderné reaktory se na produkci ionizujícího záření, které uniká do okolí, podílejí velmi málo. Díky velmi důkladnému stínění je výsledná radiační zátěž menší než například u tepelných elektráren spalujících uhlí.

V minulosti část ionizujícího záření vznikalo jako důsledek testování jaderných zbraní. Tyto testy začaly v roce 1945 a jejich množství vrcholilo v letech 1962 až 1985. V současnosti tyto zkoušky zbraní až na výjimky neprobíhají.

Zdrojem určitého množství ionizujícího záření je také lékařská diagnostika chorob a jejich léčení za pomoci nukleární medicíny.

1.3 Ionizace

Ionizace je proces, při kterém se z neutrálního atomu stává iont. Ionty vznikají tak, že je do atomového obalu částice dodáno jeden nebo více elektronů. Naopak kladné ionty, kationty, vzniknou odtržením elektronu z elektronového obalu částice. Energie, která je potřebná pro ionizaci je nazývá ionizační potenciál. Je to minimální energie, kterou musí mít dopadající částice, aby mohlo dojít k ionizaci. Tato energie se vyjadřuje v elektronvoltech. Pro různé materiály se také liší velikost ionizační energie. Obrázek číslo 3 ukazuje rozdílné velikosti ionizační energie pro různé prvky.



obr. č. 3 velikosti ionizační energie pro různé prvky

1.4 Účinky ionizujícího záření na člověka

První případy zdravotních potíží způsobených ionizujícím zářením se objevily současně s jeho objevem v roce 1896. Prvních účinků záření si povšiml německý chemik Geisel, který v roce 1900 nosil dvě hodiny na ruce připevněnou špetku radiové soli. Marie Curie tento pokus zopakovala, výsledkem byla rána, která se hojila dva měsíce. První vědci zkoumající radioaktivitu měli běžně zářením popálené prsty. Řada z nich, např. Marie Curie, zemřela na různé formy leukémie a rakoviny způsobené účinky ionizujícího záření [4].

Účinků ionizujícího záření na člověka se využívá v medicíně. Slouží k léčbě rakoviny nebo v nukleární medicíně například k zobrazení anatomických detailů vyšetřovaného pacienta. Pokud dávka ozáření přesáhne určitou mez, začne způsobovat zdravotní potíže. Dávka ionizujícího záření obdrženého člověkem se měří v jednotkách Sv. Dávka 1 Sv jakéhokoliv záření má stejné biologické účinky jako dávka 1 Gray gama záření. Jednotka vyjadřuje podíl množství absorbované energie v určité hmotnosti a v závislosti na daném druhu ionizujícího záření. Rozměr jednotky je tedy J/kg [5].

Pokud je lidské tělo vystaveno větší dávce ozáření začíná se rozvíjet tzv. nemoc z ozáření. Ta je způsobena akutním poškozením buněk ionizujícím zářením. Nejvíce jsou zářením poškozeny buňky,

kteří se rychle množí. Toho se využívá při ozařování pacientů s nádorovými onemocněními. Při větší dávce záření se začínají projevovat příznaky nemoci z ozáření. Při dávce 1 Sv se objevuje bolest hlavy a narušení imunitních buněk. Dočasně se snižuje počet červených krvinek. Při vyšší dávce 2 – 3 Sv je obvyklá nevolnost, úmrtnost je 35 % po třiceti dnech. Pokud dávka roste až k 6 až 10 Sv je naděje na přežití velmi malá [6].

Pro pracovníky s ionizujícím zářením jsou stanovené nejvyšší přípustné dávky za určitý čas. Hodnota ročního limitu činí 50 mSv. Pětiletý limit je 100 mSv. Měřením, hodnocením a usměrňováním dávek ionizujícího záření u pracovníků se zabývá ochranná dozimetrie. Zjišťování dávek ionizujícího záření u jednotlivých pracovníků je založeno na osobních dozimetrech ionizujícího záření, které stanovují celotělovou dávku od vnějších zdrojů záření. Osobní dozimetry nosí pracovníci připevněny na referenčním místě po celou dobu pobytu v kontrolovaném pásmu [3].

2 Polovodičové detektory ionizujícího záření

Polovodičový detektor ionizujícího záření je součástka, která dokáže registrovat ionizující záření, které na ni dopadá. Pomocí dalších zařízení je možné toto záření měřit. Díky malé šířce zakázaného pásu je energie potřebná k detekci záření nižší než například u detektorů plynových. Výhodou těchto typů detektorů je také snadná integrace s další měřicí elektronikou.

2.1 Rozdělení detektorů

Polovodičové detektory můžeme rozdělit podle několika kritérií:

- *Kontinuální detektory*

Tyto detektory jsou zpravidla elektronické a poskytují informace o aktuální hodnotě intenzity ionizujícího záření.

- *Kumulativní detektory*

Tento druh detektorů pracuje tak, že shromažďuje informace o okamžitých hodnotách záření. Tyto informace jsou uloženy a lze je vyvolat i po ukončení měření.

- *Fotografické detektory*

U těchto detektorů jsou měřeny fotochemické účinky dopadajícího záření. Do této kategorie patří také například mlžná komora, kde lze dráhu částic přímo zobrazit.

- *Materiálové detektory*

Tento druh detektoru vyhodnocuje dlouhodobé sledování změn vlastností látek zapříčiněné ionizujícím zářením. Vzhledem k tomuto principu mají tyto detektory nižší citlivost, proto se používají hlavně k měření záření s vysokou intenzitou. Využívají se speciálně pro měření záření složených z α částic.

2.1.1 Křemíkové detektory

Dioda bez napájení

Princip křemíkových driftových detektorů oblevili Ital E. Gatti a Slovák P. Řehák v roce 1984. První funkční prototypy se objevily o rok později.

Základním druhem je dioda bez napájení. Po průletu částice se vytvoří mnoho e-h párů, což vede ke vzniku nábojového impulsu. Tento impuls se může projevit v závislosti na zapojení diody dvojím způsobem. Pokud je obvod s diodou otevřený tak na jejich vývodech vznikne napěťový impuls. Pokud je obvod uzavřený, vznikne proudový impuls.

Bez přiloženého vnějšího napětí vznikne v oblasti PN přechodu tenká vyprázdňená oblast. Její tloušťku lze ovlivnit dotováním. Citlivý objem takové diody je velmi malý a tak je nízká i účinnost detekce. Toho lze však využít při měření záření s vysokou intenzitou. Při tomto měření lze diodu provozovat i v proudovém režimu a měřit proud protékající obvodem. Velikost proudu ukazuje okamžitou hodnotu radiace.

Dioda zapojená v závěrném směru

Jednou z nevýhod předcházejícího zapojení diody byla také velká kapacita a tím i vysoký šum. Pro spektrometrická měření se proto vždy používá dioda zapojená v závěrném směru.

Difundovaný detektor – p-materiál, na který se napaří n-příměs, nejčastěji fosfor. Vznikne tlustá vrstva n a tenká vrstva p. Tloušťka vyprázdněné oblasti je 0,1 – 2 mikrometry. Na povrchu se vytvoří tzv. mrtvá vrstva, která způsobuje negativní vlastnosti detektoru.

Povrchově bariérový detektor – zde se nevyužívá P a N polovodiče, ale přechodu polovodičkov. Substrát typu n se odleptá a na něj se napaří zlato. Podobně funguje i kombinace p-substrátu a hliníku.

Plně vyprázdněný detektor – u tohoto druhu bývá p-materiál jen slabě dotován a musí být vysoce čistý. Intenzita elektrického pole závisí na napětí. Pokud je přiložené napětí vyšší než napětí vyprázdnění, bude v celém citlivém objemu pole nenulové a při ještě vyšších napětích lze toto pole považovat za homogenní.

2.1.2 Germaniové detektory

Germaniové detektory byly běžné v 60. – 70. letech. V poslední době je vytlačují detektory HPGe. Pomocí dnešních technologií lze dosáhnout vysoké čistoty HPGe materiálů. Většina těchto detektorů se používá v režimu plného vyprázdnění.

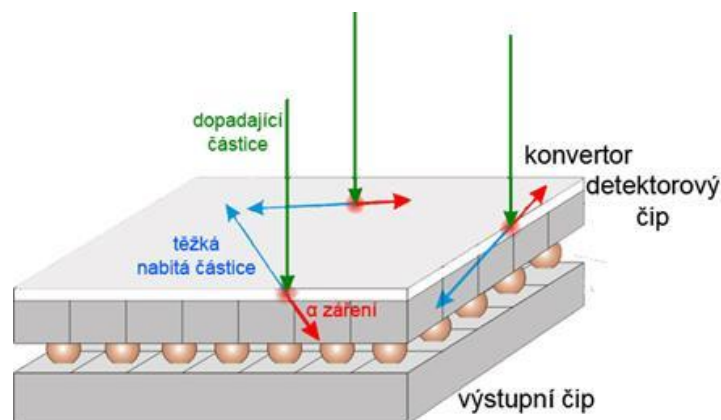
Germaniové detektory se vyrábějí v tzv. planární geometrii. To znamená, že mají pruhový tvar o průměru mezi 1 – 2 cm. Jejich citlivý objem se pohybuje okolo 10 – 20 cm³. Díky velké vyprázdněné oblasti se tento typ detektoru hodí pro měření gama záření. Objem vyprázdněné oblasti lze zvětšit zvýšením přiloženého napětí. Toto napětí však nelze zvyšovat neomezeně, protože by došlo k průrazu diody. Další možností jak dosáhnout stejného efektu je snižovat koncentraci příměsi typu N. Germaniové detektory jsou velmi citlivé na teplotu. Při pokojové teplotě je šum tak vysoký, že je nelze používat. Z toho plyne, že je třeba takové detektory chladit. Nejčastěji se používá chlazení pomocí kapalného dusíku na teplotu 77 K. U HPGe detektorů je nutné udržovat nízkou teplotu pouze po dobu měření. Naopak u Ge(Li) detektoru je nutné udržovat nízkou teplotu neustále. Při zvýšení teploty by došlo k přesunu lithiových atomů do jiných oblastí detektoru [7].

2.2 Pixelové detektory

Pixelové detektory umožňují získání dvourozměrné informace o ionizujícím záření. Tento druh detektoru tak poskytuje informace o tom, v jakém místě nabitá částice detektorem prošla. Ploškové detektory (pad detectors) byly prvním druhem detektorů, který toto umožňoval.

Zmenšováním velikosti detekčního elementu byly vyvinuty pixelové detektory. V případě pixelových detektorů z topologických důvodů není možné odvedení náboje povrchem detektoru.

Tuto problematiku řeší hybridní pixelové detektory. K senzoru se vodivě připojí čip, jehož vstupní plošky zrcadlí rozložení pixelů. Toto propojení je realizováno pomocí malých kuliček kovu, které se rozmístí na jednotlivé plošky detektoru a obě destičky se přitlačí k sobě. Tento proces je ale složitý a často vznikají špatně nakontaktované kanály.

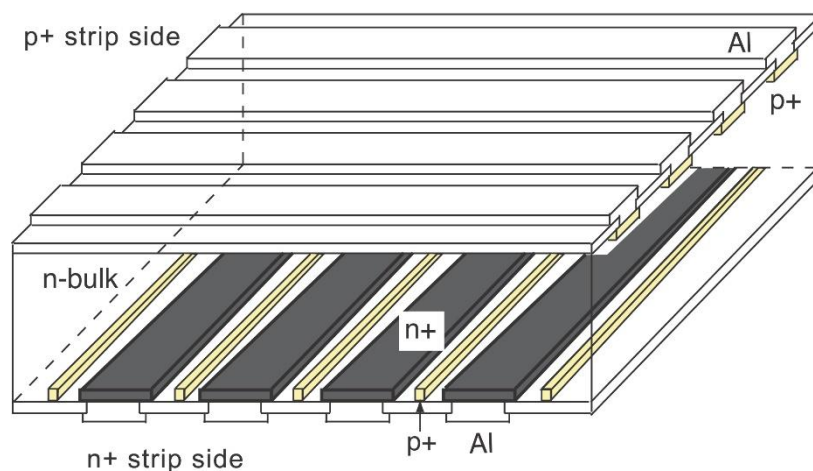


obr. č. 4 pixelový detektor

Dalším možným řešením je monolitický systém. To znamená, že detektory i elektronika jsou vyrobeny z křemíku. Tyto detektory potřebují velkou vyprázdněnou oblast a musejí být vyrobeny z křemíku s velmi vysokou čistotou. Elektronika naopak potřebuje vodivý křemík. Proto existují detektory, kde je elektronika přizpůsobena detektoru (DEPFET, MPS) a nebo naopak (MAPS). DEPFET je vyprázdněný detektor v kombinaci s tranzistorem řízeným polem – FET.

2.3 Stripové detektory

Významného zlepšení prostorového rozlišení dosáhneme, pokud rozdělíme elektrodu na proužky. Ty mají rozměry mezi desítkami až stovkami mikronů. Každý proužek, tzv. strip, musí mít svoji vlastní elektroniku, což je hlavní limitující faktor jejich rozestupů. Prostorové rozlišení závisí na velikosti rozestupů proužků a na typu informace, které z detektorů dostáváme. Při správné volbě rozestupů je nutné vzít v úvahu velikost oblaku náboje, který dorazí na druhou stranu se stripy.



obr. č. 5 stripový detektor

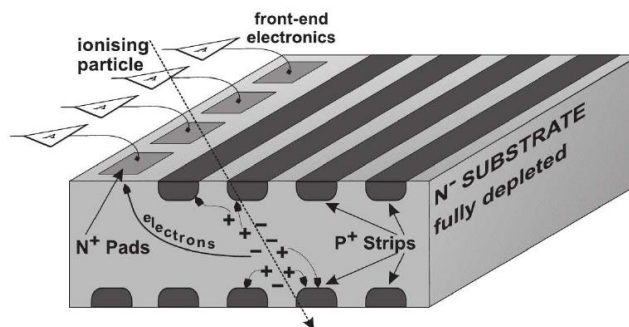
Zpracování lze provádět digitálně nebo analogově. Digitální vyčítání je nejjednodušší způsob. Předává se pouze informace ANO/NE. Účinnost této metody závisí na nastaveném prahu detekce. Ten se obvykle nastavuje jako trojnásobek úrovně šumu.

V případě analogového zpracování získáváme také informaci o amplitudě signálu na jednotlivých stripech. Díky tomu lze rekonstruovat tvar oblaku náboje a spočítat jeho těžiště. Při malé rozteči bylo dosaženo rozlišení až 2 mikrony [7].

2.4 Driftové detektory

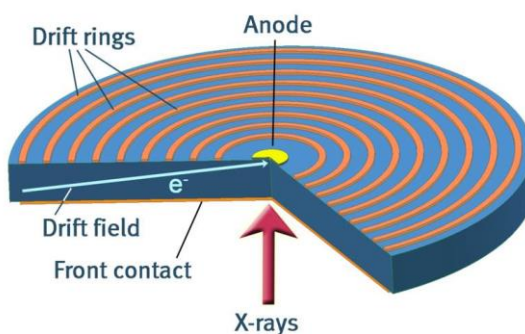
Princip driftového detektoru je založen na vytvoření dvou diod na jednom substrátu. Při malém napětí jsou obě vyprázdňené oblasti oddělené, ale po zvýšení napětí se spojí v jednu. Tím se uprostřed vytvoří údolí potenciálu. Pokud přidáme na jednu stranu ještě n-elektrodu, dostáváme driftový detektor. Lepší vlastnosti lze získat rozdělením p⁺ oblasti na stripy, čímž vznikne potenciálový spád. Tvar pole je závislý na geometrii jednotlivých elektrod. Polohu částice pak lze určit pomocí měření tzv. driftovacího času. To je doba mezi trigrem a příchodem pulsu od částice. Existuje několik druhů driftových detektorů, které se liší hlavně prostorovým uspořádáním. Každá varianta má své klady a zápory a jiné typické využití.

Maticové driftové detektory mají rozdělenou anodu na malé plošky. Tím se dosáhne možnosti měření dvourozměrné polohy.



obr. č. 6 driftový detektor

Radiální driftový detektor umožňuje jednodušší konstrukci, protože není nutné zakončovat jednotlivé stripy. Anoda má v tomto uspořádání malou kapacitu a tak detektor vykazuje velmi malý šum. Jeho uspořádání může být jednostranné nebo oboustranné. Dvourozměrná informace o poloze se získává jako úhel φ a vzdálenost od středu r .

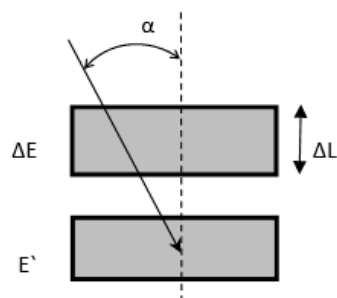


obr. č. 7 radiální driftový detektor

Oproti stripovým detektorům mají driftové detektory výhodu v nižším počtu kanálů. Jejich nevýhodou je ale nižší rychlost při zpracování signálu [7].

2.5 $\Delta E/\Delta X$ detektory

Princip $\Delta E/\Delta X$ detektoru je založen na použití dvou polovodičových detektorů o známé tloušťce. Na vstupu částic je umístěno zařízení pro přivedení částice předem známou trajektorií. Částice tak do detektoru vstupuje ve známém úhlu α a zanechá energii ΔE v horním detektoru a energii E' ve spodním detektoru. Derivace energie $\frac{dE}{dx}$ představuje ztrátu energie za délku vzdálenosti. Může být aproximována jako $\frac{dE}{dL \cdot \sec(\alpha)}$, kde dL je tloušťka detektoru v místě, kde do něj částice vstupuje. Celková energie částice je vyjádřena jako E' tedy jako energie předaná spodnímu detektoru.

obr. č. 8 princip $\Delta E/\Delta X$ detektoru

Tato metoda se velmi dobře hodí menší rychlosti částic kde je závislost $\frac{dE}{dx}$ na rychlosti velmi strmá.

3 Výrobci polovodičových detektorů

Výroba polovodičových detektorů ionizujícího záření je poměrně úzká disciplína a zabývá se jí, na rozdíl od výroby kompletních detektorů s další potřebou elektronikou, jen poměrně málo výrobců.

3.1 Současní výrobci polovodičových detektorů

CANBERRA Industries

Společnost CANBERRA Industries je jedním z předních výrobců polovodičových detektorů. Byla založena v roce 1965. Její hlavní sídlo se nachází ve Spojených státech amerických, ale své kanceláře má v mnoha zemích v Evropě. Je součástí francouzské státní korporace AREVA. Mimo výroby polovodičových detektorů se také zabývá výrobou Geiger-Müllerových a scintilační detektorů. [8]

Moxtek

Společnost Moxtek Inc. byla založena roku 1986. V roce 2004 byla tato společnost zakoupena firmou Polatechno, která sídlí v Japonsku. V dnešní době společnost Moxtek vyrábí kromě detektorů radiace také mnoho jiných zařízení jako například optiku pro projektorů nebo displaye [9].

Amptek Inc.

Společnost Amptek Inc. sídlí ve Spojených státech amerických. Mezi její výrobky patří driftové detektory a pinové detektory. Dále společnost nabízí různou elektroniku jako například předzesilovače a vícekanálové analyzátoři [10].

PNDetector

Německá společnost PNDetector sídlí v Mnichově. Specializuje se na výrobu křemíkových driftových detektorů [11].

Keltec

Společnost Keltec byla založena roku 1989 v německém Mnichově. Jejím zakladatelem a ředitelem byl Dr. Josef Kemmer, autor teorie výroby detektorů radiace s nízkou úrovní šumu. Společnost se zabývá hlavně vývojem a výrobou driftových detektorů ionizujícího záření [12].

SGX Sensortech

Firma SGX Sensortech se zabývá výrobou mnoha druhů detektorů. Mimo polovodičové driftové detektory vyrábí také detektory křemíkové s příměsí lithia [13].

Amsterdam Scientific Instruments

Společnost Amsterdam Scientific Instruments sídlí v Science Park v Amsterdamu. Zabývá se výrobou a vývojem pixelových detektorů s velkou plochou citlivé oblasti detektoru [14].

Micron semiconductor

Britská společnost Micron semiconductor byla založena roku 1983. Její hlavní sídlo se nachází v Anglii, své kanceláře však firma má i ve Spojených státech amerických a v Japonsku. Mezi její výrobky patří stripové, pixelové a radiální detektory [15].

3.2 Srovnání detektorů

Při vyhledávání výrobců polovodičových detektorů jsem nenašel výrobce, který by vyráběl všechny druhy polovodičových detektorů. Proto je srovnání jednotlivých detektorů mezi výrobci obtížné. V následující části uvádím tabulku s parametry jednotlivých detektorů od různých výrobců.

3.2.1 Křemíkové detektory

název detektoru	výrobce	aktivní oblast [mm ²]	jmenovitá tloušťka [mm]	rozlišení FWHM [eV]
SL12155	Canberra	12,5	2	155
SSL30150	Canberra	30	2	145
SSL80160	Canberra	80	5	160

3.2.2 Germaniové detektory

výrobce	relativní účinnost [%]	FWHM pro 122 keV	FWHM pro 1,3 MeV	průměr čela [mm]
Canberra	5	0,825	1,8	76
Canberra	30	0,875	1,8	76
Canberra	60	1,05	2	89

3.2.3 Stripové detektory

název detektoru	výrobce	tloušťka [μm]	citlivá oblast [cm ²]	počet kanálů
Design PP	Micron Semiconductor	65 - 500	2,56	96 (48/side)
Design VV	Micron Semiconductor	140	36	250
BB1	Micron Semiconductor	65 - 1500	16	40
BB4	Micron Semiconductor	65 - 1500	33	64
VV1	Micron Semiconductor	140	36	250

3.2.4 Pixelové detektory

název detektoru	výrobce	počet pixelů	velikost pixelu [μm]	tloušťka [μm]	frame rate [Hz]	citlivá oblast [mm]
Timepix quad QTPX-262k	Amsterdam Scientific Instruments	512 x 512	55 x 55	300	120	28 x 28
Timepix single SPPX-65k	Amsterdam Scientific Instruments	256 x 256	55 x 55	300	120	14 x 14

3.2.5 Pinové detektory

název detektoru	výrobce	citlivá oblast [mm^2]	tloušťka [μm]	Energy Resolution @ 5.9 keV (^{55}Fe) [eV]	odstup signál/ šum
XR100-CR	Amptek Inc.	6, 13, 25	500	145 - 230	
X-123	Amptek Inc.	VI.25	500	145 - 260	
XPIN-XT-006-025-P20-00	Moxtek	6	625	190	3600
XPIN-XT-013-025-P20-00	Moxtek	13	625	230	3000
XPIN-BT-006-025-150-TC	Moxtek	6	625	190	3600
XPIN-BT-013-025-150-TC	Moxtek	13	625	230	3000

3.2.6 Driftové detektory

název detektoru	výrobce	citlivá oblast [mm ²]	energy resolution @ 5.9 keV (55Fe) [eV]	tloušťka [μm]	odstup signál/šum [-]
XR-100SDD	Amptek Inc.	25	125 - 140	500	20000:1
X-123SDD	Amptek Inc.	25	125 - 140	500	20000:1
VITUS H 7	Keltec	7	129		15000:1
VITUS H 20	Keltec	20	129		15000:1
VITUS H 30	Keltec	30	129		15000:1
VITUS H 50	Keltec	50	129		15000:1
VITUS H 80	Keltec	80	136		10000:1
VITUS R 100	Keltec	92	136		400:1
SSD-05-130 BeW ic	PNDetector	5	130	450	
SSD-10-130 BeW ic	PNDetector	10	132	450	
SSD-10-130pnW UTW ic	PNDetector	10	132	450	
SSD-20-135 BeW ic	PNDetector	20	135	450	
SSD-30-135 BeW ic	PNDetector	30	135	450	
SSD-10-135 BeW ic	PNDetector	100	135	450	
SiriusSD-10128	SGX Sensortech	10	128		
SiriusSD-10133	SGX Sensortech	10	133		
SiriusSD-30128	SGX Sensortech	30	128		
SiriusSD-60133	SGX Sensortech	60	133		
SiriusSD-100133	SGX Sensortech	100	133		

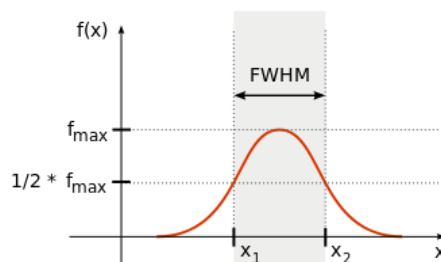
Porovnání parametrů

Citlivá nebo aktivní oblast udává velikost vstupního okénka detektoru. Čím je tato hodnota větší tím více ionizujícího záření je schopen detektor zaznamenat.

Počet pixelů u pixelového detektoru udává jak velká matice pixelů je. S touto hodnotou také souvisí velikost jednotlivých pixelů udávaná v μm.

U pixelových detektorů se také udává tzv. frame rate. To je frekvence, se kterou se čte informace z jednotlivých pixelů. Čím je tato frekvence vyšší, tím častěji se informace z pixelů zaznamenávají.

Zkratka FWHM "full width at half maximum". Česky „plná šířka v polovině maxima“. Ukazuje na rozlišovací schopnost detektoru v daném spektru. Funkce $f(x)$ reprezentuje normální rozdělení.



obr. č. 9 FWHM

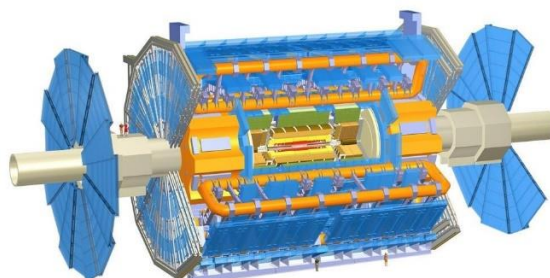
Hodnota odstup signálu od šumu (S/N) značí kolikrát lze signál zeslabit, než se dostaneme na hladinu šumu.

4 Konkrétní příklady využití polovodičových detektorů

4.1 Použití pixelových detektorů

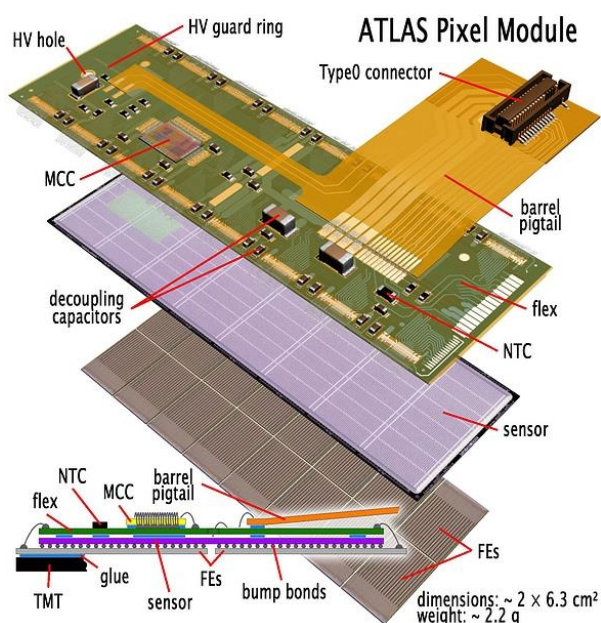
Pixelové detektory umožňují získání dvourozměrné informace o ionizujícím záření. Proto jsou v současné době využívány jako detektory pro různé vědecké experimenty.

Jedním z těchto projektů je Velký hadronový urychlovač, který začal pracovat v roce 2008. Je umístěn na hranicích mezi Francií a Švýcarskem. Urychlovač tvoří kruhový tunel o obvodu 27 kilometrů v hloubce 50 až 150 metrů pod zemí. Tunel byl postaven roku 1980 pro předchozí velký urychlovač Large Electron-Positron. Přístroj urychluje dva paprsky částic proti sobě rychlostí odpovídající 99,95 % rychlosti světla. Srážky těchto paprsků vytváří spršky částic, které jsou dále zkoumány. Urychlovač produkuje těchto srážek 30 000 000 za sekundu. Pro vyhodnocování srážek paprsků je použito několika detektorů. Jedním z nich je detektor pojmenovaný ATLAS, zkratka z názvu: A Toroidal LHC Apparatus.



obr. č. 10 detektor ATLAS

ATLAS je jeden ze čtyř víceúčelových detektorů ve Velkém hadronovém urychlovači. ATLAS zaznamenává trajektorie, energie a identitu částic, vznikajících při kolizích. Pro ATLAS je typický systém magnetů. Tvoří ho 8 magnetů, poskládaných na délku do kruhu tak, aby magnetické pole bylo nejsilnější uprostřed detektoru. Každý z těchto magnetů měří 25 metrů. Polovina pixelových detektorů pro detektor ATLAS byla vyvinuta a vyrobena v Rožnově pod Radhoštěm již zaniklou firmou Tesla Sezam [16].



obr. č. 11 pixelový detektor z experimentu ATLAS

Pixelový detektor je nejvnitřnější částí detektoru. Obsahuje tři soustředné vrstvy s celkem 1744 moduly s rozměrem 6 x 3 centimetry. Křemík v detektoru je silný 250 μm . Každý modul obsahuje 16 čipů a další elektronické součástky. Nejmenší jednotka, ze které lze přečíst informaci je pixel. Ta má rozměry 50 x 400 μm . V jednom modulu je tedy zhruba 47000 pixelů. Celkově má pixelový detektor 80 milionů vyčítacích kanálů, což je okolo 50 % z celého experimentu.

4.2 Použití driftových detektorů

Dalším souborem detektorů, které využívá Velký hadronový urychlovač, je detektor ALICE. Název je zkratkou z anglického názvu A Large Ion Collider Experiment. Obsahuje 6 vrstev detektorů. Třetí a čtvrtá vrstva je tvořena právě driftovými detektory.



obr. č. 12 soubor detektorů ALICE

Pro experiment ALICE bude Velký hadronový urychlovač srážet olověné ionty tak, aby se vytvořily podmínky shodné s těmi po Velkém třesku. Získaná data umožní fyzikům studovat stav hmoty zvaný kvark-gluonová plazma, která nejspíše při Velkém třesku existovala. Kolize v LHC způsobí nárůst teploty až na hodnoty vyšší než 100 tisíc násobků teploty jádra Slunce. Fyzikové doufají, že se při těchto podmínkách protony a neutrony roztaví a uvolní tak kvarky ze svazky s gluony. Tím vznikne kvark-gluonová plazma [16].

4.3 Srovnání polovodičových detektorů

Srovnání křemíkových a germaniových detektorů

Křemíkové detektory ionizujícího záření mají oproti germaniovým detektorům jednu nespornou výhodu. Křemíkový detektor může pracovat při vyšší teplotě. U germaniového detektoru, vlivem tepelného pohybu nosičů, vznikají v obvodu fluktuace nosičů elektrického náboje. Střední hodnota těchto odchylek je sice nulová, střední hodnota těchto kvadrátů už však nulová není a závisí na teplotě. Tento děj způsobuje u germaniového detektoru tzv. tepelný šum. Při pokojové teplotě je tepelný šum tak velký, že germaniový detektor nelze použít. Tomuto jevu lze zabránit pouze ochlazením germaniového detektoru na nižší teplotu. Detektory se chladí na teplotu 77 K. Jako chladivo se používá kapalný dusík. Při použití Ge(Li) detektoru musíme nízkou teplotu udržovat stále, jinak dojde k přesunu lithiových atomů do jiných oblastí detektoru. V případě HPGe detektoru je nutné udržovat nízkou teplotu pouze po dobu měření.

Srovnání pixelových a stripových detektorů

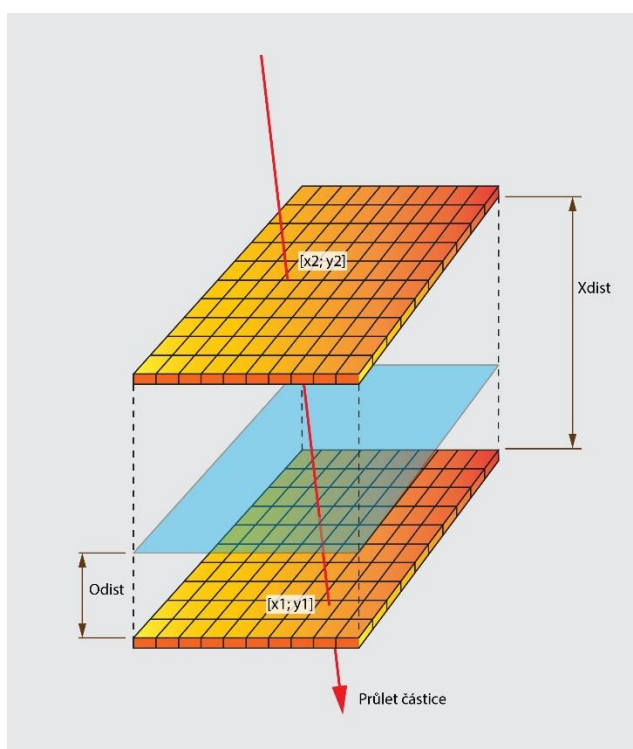
Pixelové a stripové detektory se liší, mimo jiné, prostorovým uspořádáním detekčních prvků. U oboustranného stripového detektoru můžeme získat úplnou prostorovou informaci x , y , z . U pixelových detektorů lze získat pouze informaci dvourozměrnou x , y . Další výhodou stripového detektoru je, že můžeme při analogovém vyčítání vyloučit možnost nejednoznačné události vzniklé korelací různých signálů v jednom stripu.

Nevýhodou hybridních pixelových detektorů je jejich velmi složitá výroba. K propojení čipu a senzoru se u hybridních pixelových detektorů používají malé kuličky india nebo pájky. Ty se rozmístí na čip a pak se detektor a čip stlačí k sobě. Tato technologie se nazývá bump-bonding. Tento proces je složitý a často vede ke vzniku špatně nakontaktovaných kanálů [7].

5 Určení polohy částice pomocí pixelového detektoru

5.1 Teoretický rozbor

Pomocí pixelového detektoru lze získat také informaci o poloze částic, které detektorem prolétly. Jako modelový příklad uvažují dva pixelové detektory, které jsou svisle uspořádány ve vzdálenosti X_{dist} od sebe. Všechny pixely se překrývají. Mezi těmito detektory je umístěna rovina ve vzdálenosti O_{dist} od detektoru 1 a má stejnou velikost jako pixelové detektory. Rovina je symetrická vůči středu stejně jako detektory. Oběma detektory proletí těžká, nabitá částice. Každý detektor zaznamená souřadnice jejího dopadu. Úkolem je určit souřadnice kde se částice nacházela ve vzdálenosti O_{dist} od detektoru.



obr. č. 13 ilustrace uspořádání pixelových detektorů

Jako předpoklad jsem zvolil, že se částice pohybuje mezi detektory po přímce. Výpočet souřadnic jsem provedl pomocí rovnic parametrického vyjádření této přímky. Roviny jsem zafixoval tak, že rovina spodního detektoru má souřadnici Z rovnou nule. Dále můžeme předpokládat, že $z = O_{dist}$ a pro vzdálenost horního detektoru platí $z = X_{dist}$.

Soustava rovnic tedy bude vypadat následovně:

$$X = x_1 + (x_2 - x_1) * t$$

$$Y = y_1 + (y_2 - y_1) * t$$

$$Z = z_1 + (z_2 - z_1) * t$$

Vzdálenost roviny od detektoru O_{dist} známe. Známa je také vzdálenost mezi detektory X_{dist} . Proto můžeme rovnici vyjadřující souřadnici Z přepsat jako:

$$O_{dist} = 0 + X_{dist} * t$$

Vyjádřením neznámé t získáme parametr náležející přímce, po které se částice pohybovala. Následně získáme souřadnice částice dosazením do prvních dvou rovnic.

Souřadnice $[x_1, y_1]$ a $[x_2, y_2]$ jsou body, kde dopad částice zaznamenal první a druhý detektor.

$$X = x_1 + (x_2 - x_1) * t$$

$$Y = y_1 + (y_2 - y_1) * t$$

Tento výpočet jsem přepsal jako skript pomocí programu MATLAB. První skript pracuje pouze s údaji zadanými v μm , druhý se souřadnicemi pixelů. Jejich zdrojové kódy uvádím v příloze.

5.2 Určení polohy částice pomocí stripových detektorů

Podobnou soustavu detektorů by bylo možné vytvořit také za použití stripových detektorů. Prostorové rozlišení závisí na rozteči a typu informace, kterou ze stripového detektoru dostáváme. Při volbě rozteče mezi stripy je nutné vzít v úvahu velikost oblaku náboje, který dorazí na druhou stranu se stripy.

Na rozdíl od pixelových detektorů zde máme možnost volby mezi analogovým a digitálním vyčítáním. Digitální vyčítání je jednodušší. Jeho účinnost závisí na nastaveném prahu – ten je obvykle

volen jako trojnásobek šumu. Rozlišení je definováno jako střední kvadratická odchylka mezi skutečnou a naměřenou polohou.

$$\langle \Delta x^2 \rangle = \frac{1}{p} * \int_{-p/2}^{p/2} x^2 dx = \frac{p^2}{12}$$

$$\sigma_x = \frac{p}{\sqrt{12}}$$

Je-li rozteč dostatečná pro požadovanou přesnost, je tento způsob vyhovující. V případě, že se náboj rozdělí mezi více stripů a překročí zde nastavený práh, je výsledná přesnost lepší.

Při analogovém vyčítání získáváme z detektoru i údaj o amplitudě signálu na jednotlivých stripech. Tím lze dosáhnout lepších výsledků. V tomto případě lze rekonstruovat tvar oblaku náboje a vypočítat jeho těžiště. Pro malou rozteč bylo dosaženo rozlišení až 2 μm . Současně je také získána informace o celkové předané energii.

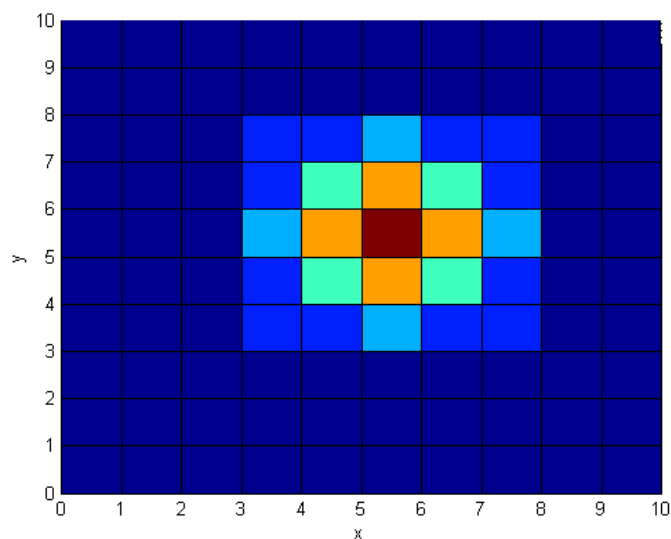
Při vyčítání je také možno zvolit variantu nábojového dělení. Při této variantě je jen část stripů připojena k elektronice. Náboj sebraný nepřipojeným stripem se dovede ke čteným stripům. Rozdělení náboje mezi sousední čtené stripy závisí na zapojení.

Nábojové dělení je možné provádět odporově nebo kapacitně. Odporové dělení však generuje šum. Při kapacitním dělení se náboj na stripech rozdělí v poměru sériově zapojených kondenzátorů. Díky stripové geometrii vznikají kapacity na detektoru automaticky, pokud mezistripovou oblast pokryjeme SiO_2 . [7]

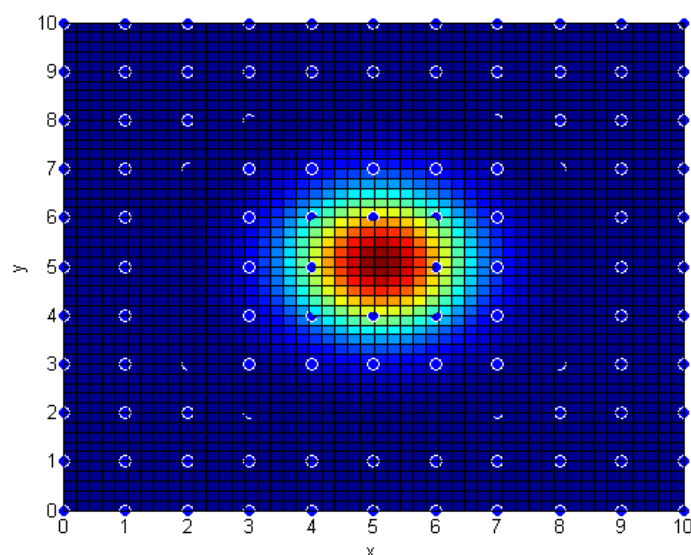
5.3 Aproximace clusteru pixelového detektoru pomocí Gaussovy funkce

Pro zvýšení přesnosti určení polohy dopadu částice lze cluster pixelového detektoru aproximovat pomocí Gaussovy funkce [17]:

$$f(x, y) = A * \exp\left(-\left(\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)\right)$$



obr. č 14 výstup pixelového detektoru



obr. č. 15 aproximace pomocí Gaussovy funkce

Na obrázku č. 14 je zobrazen možný výstup z pixelového detektoru. Jednotlivé pixely udávají zaznamenanou velikost energie dopadu částice. Určení polohy dopadu lze provést analýzou, který pixel zaznamenal největší energii. Na obrázku č. 15 je vypočítána a znázorněna aproximace těchto dat pomocí Gaussovy funkce. Pro výpočet jsem použil program MATLAB a Curve fitting toolbox. Výsledkem byly koeficienty: $A = 8,07$; $x_0 = 5$; $y_0 = 5$; $\sigma_a = 1$; $\sigma_b = 1$. Takto vygenerovaný skript je uveden v příloze.

Dostáváme tedy funkci:

$$f(x, y) = 8,07 * \exp\left(-\left(\frac{(x-5)^2}{2} + \frac{(y-5)^2}{2}\right)\right)$$

Zjistit polohu částice je možné například výpočtem gradientu výsledné Gaussovy funkce. V bodě, kde se gradient funkce rovná nule, je vrchol grafu. Jinými slovy hledáme globální maximum této funkce. Souřadnice tohoto bodu jsou souřadnicemi dopadu částice.

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} i + \frac{\partial f}{\partial y} j$$

Pomocí parciální derivace podle x a y vypočítáme kde se nachází globální maximum [18]. Výpočet jsem pro zjednodušení provedl pomocí stránek WolframAlpha.

$$\frac{\partial f}{\partial x} = (40,35 - 8,07x) * e^{-\frac{1}{2}(x-5)^2 - \frac{1}{2}(y-5)^2}$$

Stejně tak vypočítáme derivaci podle y.

$$\frac{\partial f}{\partial y} = (40,35 - 8,07y) * e^{-\frac{1}{2}(x-5)^2 - \frac{1}{2}(y-5)^2}$$

Obě tyto rovnice položíme rovny nule a vypočítáme jako soustavu dvou rovnic o dvou neznámých. Výsledkem budou souřadnice x=5 a y=5.

Závěr

Ve své bakalářské práci jsem se zaměřil na polovodičové detektory ionizujícího záření. Popsal a porovnal jsem druhy detektorů. Pro detekci záření jsou z uživatelského hlediska vhodnější detektory křemíkové než germaniové. Germaniové je nutné chladit na nízkou teplotu, což přináší další komplikace při jejich provozu. Tento nedostatek trochu umenšují HPGe detektory, které je nutno chladit pouze v průběhu měření. Pro polohovou detekci jsou velmi vhodné pixelové detektory. Jejich výroba, například pomocí metody bump-bondingu, je technologicky náročná. Výrobou polovodičových detektorů se zabývá nemnoho firem. Podařilo se mi nalézt pouze 9 výrobců.

Polohové detektory ionizujícího záření se používají hlavně při různých vědeckých experimentech. Jako jeden z nich mohu jmenovat Velký hadronový urychlovač ve Švýcarsku, který slouží k výzkumu v oboru fyziky částic.

V poslední části jsem se zabýval určením polohy částice pomocí pixelových detektorů. Polohu částice lze zjistit pomocí dvou nad sebou umístěných detektorů. Okamžitou polohu částic jsem vypočetl určením dráhy jejího letu mezi detektory. Zpřesnit polohu dopadu částice je možné aproximací clusteru pixelového detektoru pomocí Gaussovy funkce. Výpočtem jejího gradientu lze zjistit přesnější polohu dopadu. Toto zlepšení se projeví zvláště v případě, že několik sousedních pixelů zaznamená podobnou energii dopadu částice.

Použitá literatura

- [1] STÁTNI ÚSTAV RADIČNÍ OCHRANY. *Biologické účinky ionizujícího záření* [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/biologicke-ucinky-ionizujiciho-zareni>
- [2] Ionizující záření. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Ionizuj%C3%ADc%C3%AD_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD
- [3] Radiační ochrana. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/RadOchrana.htm>
- [4] JIHOČESKÁ UNIVERZITA. *Léčba radiačního syndromu* [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra_7169/ch04.htm
- [5] ENCYCLOPEDIA BRITANNICA. *Sievert* [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/543504/sievert-Sv>
- [6] STÁTNI ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Stručný přehled biologických účinků záření* [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/oznameni-a-informace/strucny-prehled-biologickych-ucinku-zareni/>
- [7] ÚSTAV ČÁSTICOVÉ A JADERNÉ FYZIKY. *Polovodičové detektory v jaderné a subjaderné fyzice* [pdf]. 2007 [cit. 2013-05-13].
- [8] CANBERRA INDUSTRIES. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.canberra.com>
- [9] MOXTEK. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.moxtek.com/>
- [10] AMPTEK INC. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.amptek.com/>
- [11] PNDETECTOR. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.pndetector.de/>
- [12] KELTEC. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.keltec.co.uk/>
- [13] SGX SENSORTECH. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.sgxsensortech.com/>
- [14] AMSTERDAM SCIENTIFIC INSTRUMENTS. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.amscins.com/>
- [15] MICRON SEMICONDUCTOR. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.micronsemiconductor.co.uk/>
- [16] CERN. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://home.web.cern.ch/>
- [17] Pixel detectors for imaging with heavy charged particles. [online]. 2008 [cit. 2013-06-03]. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [18] Gradient. [online]. [cit. 2013-06-03]. Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/Gradient.html>

Přílohy

1 Určení polohy částice, údaje zadány v μm – skript v programu MATLAB

position_um.m

```
function [x_pos,y_pos,err] = position_um(x1,y1,x2,y2,sensor_distance,dut_distance,x_pixel,y_pixel,pixel_size)
% x_pos [um] - souradnice x kde castice proletla skrz dut (device under test)
% y_pos [um] - souradnice y kde castice proletla skrz dut
% x1 [um] - souradnice x castice v detektoru 1
% y1 [um] - souradnice y castice v detektoru 1
% x2 [um] - souradnice x castice v detektoru 2
% y2 [um] - souradnice y castice v detektoru 2
% sensor_distance [um] - vzdalenost mezi sensory
% dut_distance [um] - vzdalenost mezi prvnim sensorem a dutem
% pixel_size [um] - velikost pixelu v um
% err [0/1] - je-li err= 1 - částice mimo plochu detektoru
% x_pixel - počet pixelů v ose x
% y_pixel - počet pixelů v ose y

sensor_dimensions_x = pixel_size * x_pixel; % délka detektoru v ose x
sensor_dimensions_y = pixel_size * y_pixel; % délka detektoru v ose y

if (pixel_size <= 0)
    disp('Velikost pixelu nemůže být nula nebo záporná.');
```

% ošetření velikosti pixelu

```
return
end

if (x1 > sensor_dimensions_x) || (y1 > sensor_dimensions_y) || (x2 > sensor_dimensions_x) || (y2 >
sensor_dimensions_y)
    err = 1;
else
    % určení, zda se částice nachází uvnitř detektoru
    err = 0;
end

if (sensor_distance <= 0)
    % ošetření vzájemné polohy detektorů
    disp('Vzdálenost mezi detektory nemůže být nulová nebo záporná.');
```

return

```
end

if (dut_distance < 0) || (dut_distance > sensor_distance)
    disp('Vzdálenost částice od detektoru nemůže být záporná nebo větší než vzdálenost mezi detektory.');
```

% kontrola rozsahu vzdálenosti

```
else

t = dut_distance / sensor_distance; % výpočet parametru t náležející křivce po které se částice pohybovala
x_pos = x1 + (x2 - x1) * t; % parametrické vyjádření přímkou
y_pos = y1 + (y2 - y1) * t;

end
end
```

2 Určení polohy částice, údaje zadány v počtu pixelů – skript v programu MATLAB

position_pixels.m

```
function [x_pos,y_pos] = position_pixels(x1,y1,x2,y2,sensor_distance,dut_distance,pixel_size)
% x_pos [pixel] - souradnice x kde castice proletla skrz dut (device under test)
% y_pos [pixel] - souradnice y kde castice proletla skrz dut
% x1 [pixel] - souradnice x castice v detektoru 1
% y1 [pixel] - souradnice y castice v detektoru 1
% x2 [pixel] - souradnice x castice v detektoru 2
% y2 [pixel] - souradnice y castice v detektoru 2
% sensor_distance [um] - vzdalenost mezi sensory
% dut_distance [um] - vzdalenost mezi prvnim sensorem a dutem
% pixel_size [um] - velikost pixelu v um
% není nutná hodnota err, protože jsou hodnoty zadávány přímo v počtu pixelů
if (pixel_size <= 0)
    disp('Velikost pixelu nemůže být nula nebo záporná. '); % ošetření velikosti pixelu
return
end

if (sensor_distance <= 0) % ošetření vzájemné polohy detektorů
    disp('Vzdálenost mezi detektory nemůže být nulová nebo záporná. ');
return
end

if (dut_distance < 0) || (dut_distance > sensor_distance)
    disp('Vzdálenost částice od detektoru nemůže být záporná nebo větší než vzdálenost mezi detektory. ');
return
end % kontrola rozsahu vzdálenosti

x1_um = pixel_size * x1; % přepočít souřadnic (počtu pixelů) na um
y1_um = pixel_size * y1;

x2_um = pixel_size * x2;
y2_um = pixel_size * y2;

t = dut_distance / sensor_distance; % výpočet parametru t náležející křivce po které se částice pohybovala

X_um = x1_um + (x2_um - x1_um) * t; % parametrické vyjádření přímky
Y_um = y1_um + (y2_um - y1_um) * t;

x_pos = fix(X_um / pixel_size); % přepočít souřadnice X polohy částice z um na počet pixelů
y_pos = fix(Y_um / pixel_size); % přepočít souřadnice Y polohy částice z um na počet pixelů

end
```

3 Aproximace clusteru pixelového detektoru Gaussovou funkcí – skript v programu MATLAB

createfit.m

```
function [fitresult, gof] = createFit1(x, y, z)
```

```
[xData, yData, zData] = prepareSurfaceData( x, y, z );
```

```
% Set up fitype and options.
```

```
ft = fitype( 'a1*exp(-(x-x0)^2/(2*1^2)-(y-y0)^2/(2*1^2))', {'x', 'y'}, 'dependent', 'z' );
```

```
opts = fitoptions( ft );
```

```
opts.Display = 'Off';
```

```
opts.Lower = [-Inf -Inf -Inf];
```

```
opts.StartPoint = [0.262211747780845 0.602843089382083 0.711215780433683];
```

```
opts.Upper = [Inf Inf Inf];
```

```
% Fit model to data.
```

```
[fitresult, gof] = fit( [xData, yData], zData, ft, opts );
```

```
% Plot fit with data.
```

```
figure( 'Name', 'untitled fit 1' );
```

```
h = plot( fitresult, [xData, yData], zData );
```

```
legend( h, 'untitled fit 1', 'z vs. x, y', 'Location', 'NorthEast' );
```

```
% Label axes
```

```
xlabel( 'x' );
```

```
ylabel( 'y' );
```

```
zlabel( 'z' );
```

```
grid on
```

```
view( 0.0, 90 );
```