

Detektory ionizujícího záření

Detektory ionizujícího záření jsou čidly záření [D1]. Existuje mnoho typů detektorů, které jsou založeny na různých principech. Zde je uveden základní přehled tzv. elektrických detektorů IZ, které v reálném čase převádějí záznam o přítomnosti ionizujícího záření na elektrický signál. Jádrem obecného elektrického detektoru je tzv. aktivní objem, což je prostor, ve kterém jsou jednotlivé částice zaznamenány [D2]. Na krajích aktivního objemu se nacházejí elektrody, na které je přivedeno vysoké napětí. Průlet částice ionizuje médium aktivního objemu a vytvoří nosiče náboje, které jsou následně odvedeny k elektrodám. Na tomto principu jsou založeny plynové detektory a polovodičové detektory. U plynových detektorů jsou nosiči náboje ionty, zatímco u polovodičových detektorů jsou to elektrony a díry. Počet vzniklých nosičů náboje je závislý na energii částice. U scintilačních detektorů se aplikuje jiný princip detekce, který je založen na vybuzení světelných záblesků, které jsou způsobeny scintilačními fotony. Tyto fotony jsou emitovány interakcí s ionizujícím zářením v materiálech, které se pro tuto vlastnost nazývají scintilátory. Dále již je zpracováván světelný signál, který je převeden a nejčastěji i zesílen pomocí fotonásobiče na elektrický signál.

Elektrické detektory IZ lze provozovat ve dvou základních režimech, v četnostním (impulzním) nebo proudovém. Pro tyto režimy může být využit tentýž detektor, rozdíl je však v jeho elektrickém zapojení. U jednotlivých režimů se volí rozdílná časová konstanta RC-článku, viz níže. V impulzním režimu jsou vyhodnocovány jednotlivé dopady částic IZ (události) samostatně. Často se v tomto režimu detekuje energie těchto událostí. Následně mohou být vytvořena četnostní spektra energie.

D.1 Stručný přehled různých typů detektorů převádějící měřenou informaci o ionizaci na elektrický signál

Standardně se můžeme setkat se třemi základními typy elektrických detektorů IZ, které jsou schopny převádět informace o interakci s IZ na elektrický signál, ať už přímo či nepřímo. Patří mezi ně detektory plynové, polovodičové a scintilátory. Detektory IZ standardně pracují buď v impulzním, nebo v proudovém režimu. V impulzním režimu se vyhodnocují jednotlivé průlety částic skrz aktivní objem (události). V tomto režimu lze určit energii jednotlivých částic. V proudovém režimu se vyhodnocuje míra událostí, respektive lze vypočítat radiační zátěž, které byl detektor vystaven. Radiační zátěž se nazývá dávka, jejíž jednotkou je jeden Grey [Gy], který je definován jako Joule na kilogram [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]. Nejjednodušší způsob vyhodnocení se provádí pomocí RC článku. Časová konstanta RC se volí v závislosti na režimu, kterým chceme měřit. Pro zapojení vyhodnocovacího RC článku se volí časová konstanta tak, aby byla přibližně stejná jako doba sběru nosičů náboje t_s . Doba

sběru je čas, který je potřeba k odvedení veškerých nosičů náboje, které vznikly ionizací. V proudovém režimu se volí časová konstanta RC výrazně větší, než je doba sběru t_s [D2].

D.1.1 Plynové detektory

Plynové detektory jsou založeny na využití aktivního objemu, kterým je nějaký (konkrétní) plyn. Nejjednodušší plynové detektory používají jako plyn v aktivním objemu vzduch. Mezi tyto detektory se řadí například ionizační komory (IK). Ty jsou tvořeny pomocí dvou elektrod, mezi kterými je definovaný objem. Nejčastěji se můžeme setkat s ionizačními komorami, které mají buď koaxiální elektrody, nebo paralelní kruhové desky. Elektrody mají definovanou geometrii, proto lze určit náboj, který byl vytvořen po vzniku události. Popř. při zapojení IK v proudovém režimu lze vypočítat z naměřeného proudu typicky v jednotkách [pA] až stovkách [nA], dávkový příkon v [μ Gy/h]. Pro výpočet dávkového příkonu z naměřené hodnoty proudu je třeba znát tzv. kompenzační faktory. Jeden je dán přímo k ionizační komoře výrobcem, popř. lze zjistit kalibraci. Druhý je dán změnou teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu, jelikož je zde využit vzduch jako plyn, který vyplňuje aktivní objem. Napětí na elektrodách ionizačních komor bývá nastaveno na 250 V.

Dalšími plynovými detektory jsou Geiger-Müllerovy (G-M) počítače, kde je ionizován plyn v utěsněné trubici, v jehož důsledku vznikne Geiger-Müllerův výboj. Jsou vhodné pro detekci záření s nízkou četností impulzů [D2]. Napětí na elektrodách G-M počítačů je voleno v závislosti na jeho velikosti a plynu v aktivním objemu. Pohybuje se od cca 300 V u nejmenších G-M počítačů až po 1 kV u větších G-M trubic.

Dále můžeme uvést ještě proporcionální detektory, kde je vzorek (zářič) umístěn přímo dovnitř aktivního objemu. Tyto detektory lze využít např. pro kalibraci aktivity uzavřených zářičů, jelikož jsme schopni pomocí proporcionálních detektorů zaznamenat všechny částice vyzařené vzorkem.

D.1.2 Scintilátory

Dalším typem detektorů IZ jsou scintilátory. To jsou detektory, které jsou založeny na vzniku slabých světelných záblesků při interakci IZ s vhodným transparentním materiálem. Používají se buď organické, nebo anorganické sloučeniny, které jsou zpravidla dielektriky. Tyto látky jsou umístěny v reflektoru, aby byly světelné záblesky odrazeny do okénka. Ke scintilátorům se zpravidla využívají fotonásobiče, což je zařízení, které v několika stupních zesílí signál z fotokatody, která je jeho součástí. Záblesk ze scintilátoru dopadne skrze okénko na fotokatodu, ze které jsou na základě fotoefektu vyraženy elektrony. Tyto elektrony dále dopadnou na dynodu, ze které jsou opět vyraženy další elektrony, které míří k další dynodě. Fotonásobiče jsou většinou vícestupňové, každý stupeň je

reprezentován dynodou. Poslední stupeň je realizován anodou, odkud lze měřit proudový signál. Celý fotonásobič je umístěn ve vakuové trubici, nejčastěji se používá jako materiál trubice sklo. Mezi fotokatodou a anodou je připojeno vysoké napětí, které je dále rozděleno jednotlivými dynodami. Záporný pól je připojen k fotokatodě a kladný k anodě, kde jsou sbírány elektrony z fotonásobiče. Napětí mezi fotokatodou a anodou je mezi jednotlivými dynodami rozděleno pomocí rezistorového děliče [D2].

D.1.3 Polovodičové detektory – základní princip a přehled

Polovodičové detektory jsou založeny na specifických vlastnostech polovodičů. Pokud nebudou v polovodičích vytvořeny žádné nosiče náboje, nepovedou elektrický proud. Ve vlastních polovodičích vznikají nosiče náboje vždy v páru elektron-díra. Elektron je uvolněn z valenčního pásu do vodivostního, kde může vést elektrický proud podobně jako ve vodičích. Místo ve valenčním pásu po uvolnění elektronu zůstane prázdné a nazývá se díra. Díra může být obsazena valenčním elektronem z vedlejšího atomu, čímž se posune. Tímto posouváním děr je také veden elektrický proud. Díry jsou nosiči kladného náboje, jelikož díky uvolněnému elektronu chybí atomu záporný náboj. Počet elektronů a děr se zvyšuje v závislosti na teplotě polovodiče. Tato vlastnost je odlišná v polovodičích na rozdíl od vodičů a rezistorů, u kterých se se zvyšující teplotou zvyšuje elektrický odpor materiálu a při přiloženém shodném napětí se procházející elektrický proud snižuje. Naopak u polovodičů dochází vlivem zvyšující se teploty ke vzniku více párů elektron-díra a čím je v polovodiči více nosičů náboje, tím lépe vede elektrický proud a jeho rezistivita tím klesá. Mezi valenčním pásem a vodivostním se nachází zakázaný pás, pro jehož překonání je potřeba energie cca 1 eV [26],[D3].

Kromě vlastních polovodičů existují ještě polovodiče příměsové. Polovodičový materiál je dopován příměsným prvkem. Rozlišujeme 2 typy dopantů, donory a akceptory. Donory uvolní do vodivostního pásu elektrony navíc, naopak akceptory pohltí navíc jeden elektron z valenčního pásu a vznikne díra. Příměsové polovodiče, kde převažují volné elektrony, se nazývají typ N a s převažujícími dírami typ P.

Tyto typy příměsových polovodičů se nejčastěji využívají společně, čímž dojde ke vzniku tzv. PN přechodu, přes který protéká elektrický proud pouze v propustném směru. Opačný směr se nazývá závěrný. V propustném směru je k polovodiči typu p přivedeno kladné napětí a k typu n záporné. Na PN přechodu přecházejí elektrony z vodivostního pásu v polovodiči typu N do polovodiče typu P, kde obsazují díry ve valenčním pásu. Naopak v závěrném směru, kdy je k typu P přivedeno záporné napětí a k typu N kladné, dojde k nahromadění nosičů náboje u elektrických kontaktů, kde vznikne N^+ resp. P^+ vrstva. V okolí PN přechodu vznikne vyprázdňená oblast, kde se nenacházejí žádné nosiče náboje a

tudíž tato polovodičová součástka obsahující PN přechod nevede elektrický proud. Vyprázdněná oblast v okolí PN přechodu může sloužit jako aktivní objem detektoru IZ.

Ionizační záření působí v polovodičích tak, že dochází podél trajektorie nabitě částice nebo fotonu ke tvorbě párů elektron-díra. Nosiče náboje jsou potom odvedeny k elektrickým kontaktům. Výhodou polovodičových detektorů je velká rozlišovací schopnost okolo 3 eV, což je vhodné pro spektroskopii. Nejčastěji se jako detektory používají křemíkové nebo germaniové polovodiče, dále např. CdTe atd.

Typů polovodičových detektorů je velice mnoho. Zde je uveden pouze stručný základní přehled. Nejjednodušším polovodičovým typem detektorů jsou křemíkové diodové detektory. Křemíkové detektory založené na bázi PN-přechodu mají velice široké rozšíření. Detektory pouze s jedním PN přechodem nemají polohové rozlišení. Diodové křemíkové detektory se používají ve spektroskopii, také jimi lze měřit ztrátu energie, čímž lze identifikovat částice. Použití p-i-n diod, kde je mezi polovodičem typu P a N ještě umístěna tzv. intrinická oblast tj. téměř bez nosičů náboje, lze uskutečnit ve spektroskopii vyšších energií, kde by nestačila vyprázdněná oblast standardního PN-přechodu.

Často se pro spektroskopii využívají germaniové detektory. Nejrozšířenější jsou HPGe detektory, které jsou chlazeny na velmi nízkou teplotu nejčastěji pomocí kapalného dusíku, který je umístěn v Dewarově nádobě pod detektorem. Teplota varu dusíku je přibližně -196°C [D4], takže na tuto teplotu je detektor vychlazen. Zde se využívá závislosti počtu nosičů náboje v polovodičích na teplotě. Tento typ detektoru se využívá pro velmi přesné spektroskopické měření.

Dále existuje celá řada polovodičových polohově citlivých detektorů IZ. Např. stripové detektory, pixelové detektory na bázi CCD čipů a monokrystalové polohově citlivé detektory mezi které patří i detektor Timepix. Většina polohově citlivých polovodičových detektorů využívá segmentaci polovodičů. V případě stripových detektorů jsou to pruhy polovodičů, kterými je detekována poloha události. Polohu detekce události je možné určit pomocí souřadnic segmentu, kde byla událost detekována. Pokud je událost detekována více segmenty vedle sebe, tak pravděpodobně detekovaná částice nedopadla kolmo k ploše detektoru. Úhel dopadu lze určit ze znalosti tloušťky aktivního objemu a počtu segmentů. Energie částice je dána celkovým odvedeným nábojem, který se vytvořil v aktivním objemu. Pro 2D rozlišení stripového detektoru se využívá 2 úrovně stripových detektorů, které jsou vůči sobě kolmé. Jedna sada segmentů detekuje ve směru osy X a druhá sada ve směru osy Y. Místo události určí souřadnice segmentů, jimž byl dopad částice detekován. U CCD detektorů je vrstva polovodiče segmentována do čtvercových oblastí. Místo dopadu je pak určeno detekcí konkrétním pixelem. Elektronika pro detekci CCD čipu je společná a výsledný pixel je dán vlastnostmi signálu.

Seznam literatury použitý pouze v této příloze

- [D1] ŠEDA, J., SABOL, J., KUBÁLEK, J., *Jaderná elektronika*, SNTL Praha (1977) 04-532-77
- [D2] GERNDT, J., PRŮŠA, P., *Detektory ionizujícího záření*, Skripta, ČVUT v Praze (2011)
ISBN 978-80-0104-710-1
- [D3] SPIELER, H., *Semiconductor Detector System*, Oxford University Press (2005) ISBN 0–
19–852784–5 978–0–19–852784–8
- [D4] KOLÁŘ, K., Pokusy s kapalným dusíkem. In: *fyzweb.cz* [online] Katedra didaktiky
fyziky, MFF UK v Praze [cit. 22.9.2021]. Dostupné z:
<http://fyzweb.cz/materialy/vlachovice/2015/materialy/kolar/c-kolar-dusik.pdf>