



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jindřich Pipek

Vliv kontaktů na sběr náboje v detektorech rtg a gama záření

Fyzikální ústav Univerzity Karlovy
Oddělení polovodičů a polovodičové optoelektroniky

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Eduard Belas, CSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2016

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

Název práce: Vliv kontaktů na sběr náboje v detektorech rtg a gama záření

Autor: Jindřich Pipek

Ústav: Fyzikální ústav Univerzity Karlovy
Oddělení polovodičů a polovodičové optoelektroniky

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Eduard Belas, CSc., Fyzikální ústav Univerzity Karlovy

Abstrakt: V této práci byl studován vliv kovových kontaktů připravených z alkoholového a vodního roztoku chloridu zlatitého na polovodičovém materiálu CdZnTe na detekční schopnosti detektoru rtg a gama záření. Na kvalitu kontaktů mají rovněž vliv i povrchové úpravy. Z monokrystalu CdZnTe byl vyroben testovací detektor. Byly změřeny elektrické, spektroskopické a optické metody charakterizace detektoru a porovnány jejich výsledky pro zmíněné typy kontaktů. Hlavním cílem bylo ukázat možnost chemické přípravy kvalitních kontaktů z alkoholového roztoku chloridu zlatitého. Alkoholové kontakty představují novou metodiku pro přípravu chemických kontaktů a slibují odlišné vlastnosti od standardních chemických kontaktů připravených z vodního roztoku chloridu zlatitého.

Klíčová slova: kontakt kov-polovodič, detektory záření, CdZnTe

Title: Study of the charge collection efficiency affected by metalization in Gamma and X-ray detectors

Author: Jindřich Pipek

Institute: Institute of Physics of Charles University

Supervisor: doc. Ing. Eduard Belas, CSc., Institute of Physics of Charles University

Abstract: In this thesis, the influence of metal contacts, prepared on CdZnTe-based semiconductor material by electroless deposition using aqueous or alcohol based solution, on the detection quality of Gamma and X-ray detectors. The quality of metal contacts is also affected by surface treatments. From single crystal of CdZnTe the testing detector was made. Electrical, spectroscopic and optical characterization techniques were used and their results were compared for two mentioned types of contacts. The aim was to show the possibility of preparing high quality metal contacts prepared from alcohol based solution of Gold(III) chloride. Alcohol based contacts are new method for preparing chemical contacts and promise different properties from standard chemical contacts prepared from aqueous based solution of Gold(III) chloride.

Keywords: metal-semiconductor contact, radiation detectors, CdZnTe

Rád bych poděkoval všem pracovníkům oddělení polovodičů a polovodičové optoelektroniky při Fyzikálním ústavu Univerzity Karlovy za pomoc při práci a za veškeré praktické rady. Obzvláště bych chtěl poděkovat vedoucímu této bakalářské práce doc. Ing. Eduardu Belasovi, CSc. za zodpovídání mých častých dotazů a za obětavou pomoc při měření a interpretování získaných výsledků. Nesmírné poděkování samozřejmě patří mým rodičům za neustávající podporu ve všem, co dělám.

Obsah

Úvod	3
1 Teoretická část	4
1.1 Ionizující záření	4
1.2 Interakce ionizujícího záření s látkou	4
1.2.1 Fotoelektrický jev	4
1.2.1.1 Vnitřní fotoefekt	5
1.2.1.2 Vnější fotoefekt	5
1.2.2 Comptonův jev	6
1.2.3 Vznik elektron-pozitronového páru	6
1.3 Detekce ionizujícího záření polovodičovými detektory	7
1.3.1 Požadavky na parametry polovodičového detektoru	7
1.3.2 (CdZn)Te	8
1.4 Elektrické kontakty	8
1.4.1 Ideální Ohmický kontakt	9
1.4.2 Ideální Schottkyho kontakt	9
1.4.3 Reálný kontakt kov-polovodič	11
2 Experimentální část	12
2.1 Charakterizační metody	12
2.1.1 V-A charakteristiky	12
2.1.2 Standardní spektroskopická měření	12
2.1.3 Hechtova relace a určení $\mu\tau$	14
2.1.4 Měření tranzientních proudů - TCT	14
2.1.4.1 Určení elektrických a transportních parametrů	15
2.2 Příprava vzorku	18
2.2.1 Řezání vzorku	18
2.2.2 Broušení vzorku	18
2.2.3 Mechanické leštění vzorku	19
2.2.4 Chemické leptání	19
2.2.5 Nanesení kovových kontaktů	19
2.2.6 Odstranění kovových kontaktů	20
3 Výsledky měření a diskuze	21
3.1 Příprava vzorku	21
3.2 V-A charakteristiky	21
3.3 Spektrální analýza	22
3.4 TCT	28
3.5 Adheze kontaktů	32
4 Shrnutí a závěr	35
Seznam použité literatury	36
Seznam obrázků	37

Seznam tabulek	38
Seznam použitých zkratek	39

Úvod

Tato bakalářská práce se zaměřuje na porovnání vlivu zlatých kontaktů připravených z vodního resp. alkoholového roztoku chloridu zlatitého na vlastnostech detektorů rtg a gama záření. Elektrické kontakty připravené z vodního roztoku (vodní kontakty) jsou běžně používané, o jejich vlastnostech na polovodičovém materiálu teluridu kadmato-zinečnatém (CZT) pojednává například [1]. Použití zlatých kontaktů připravených z alkoholového roztoku chloridu zlatitého (alkoholové kontakty) není běžné a vyplynulo z privátní konverzace s A. Zappettinim z univerzity v Parmě, Itálie. Alkoholové kontakty slibují jiné fyzikální vlastnosti oproti vodním kontaktům. Porovnání obou typů kontaktů je cílem této práce. Vlivem kontaktů na polovodičové detektory gama záření se zabývá [2]. CZT je v současnosti populární materiál pro použití pro detektory gama a rtg záření, což vede k aplikaci tohoto materiálu v bezpečnostní, zdravotní a vědecké sféře. Přesto, že je tento materiál studován již déle než 50 let, stále jsou zde problémy v pěstování velkých monokrystalických krystalů, stejně tak i v nanášení kvalitních kovových kontaktů (více viz [3]). Vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v teoretické části. Tento materiál je schopen pracovat za pokojové teploty, což je značná výhoda oproti materiálům vyžadujícím stálé chlazení.

Tato práce se sestává z následujících částí. Kapitola č. 1 - Teoretická část, kde je nastíněno základní rozdělení ionizujícího záření spolu s interakcí s hmotou. Dále jsou zde uvedeny typy elektrických kontaktů a jejich vlastnosti. Kapitola č. 2 - Experimentální část, ve které jsou popsány charakterizační metody pro stanovení vlastností detektorů a postup přípravy detektorového materiálu ze surového ingotu. V kapitole č. 3 jsou naměřená data a výsledky měření spolu s jejich diskuzí. V závěrečné kapitole jsou shrnuty výsledky a nastíněny možnosti dalšího výzkumu.

1. Teoretická část

1.1 Ionizující záření

Ionizující záření je záření, jehož kvanta (fotony v případě elektromagnetického záření nebo částice hmoty) nesou dostatek energie k odtržení elektronu z elektronového obalu atomů nebo molekul. Tím vznikne z původně neutrální molekuly kladně nabitý kationt a volný elektron.

Druhy ionizujícího záření:

1. záření α - proud jader hélia ${}^4_2\text{He}$
2. záření β - proud elektronů nebo pozitronů. Existují dva druhy: β^- tvořené proudem elektronů a β^+ tvořené proudem pozitronů.
3. záření γ - vysoce energetické elektromagnetické záření
4. neutronové záření - proud volných neutronů.
5. rentgenové záření - elektromagnetické záření (fotony emitované v elektronovém obalu)

Záření α, β, γ i neutronové záření vznikají při jaderných reakcích, zatímco rentgenové záření vzniká, když elektrony, které vyletují ze žhavené katody a jsou urychlovány elektrickým polem, narazí na terč. Rentgenové záření se podle způsobu vzniku dělí na:

1. Brzdné záření - elektromagnetické záření, které vzniká coulombickou interakcí rychle letících elektronů po dopadu na terč, elektrony jsou brzděny a změny svou dráhu. Energie, kterou při tom ztratí se vyzáří ve formě fotonu. Energie závisí na rychlosti elektronů a nezávisí na materiálu terče.
2. Charakteristické záření - elektromagnetické záření, které vzniká coulombickou interakcí pohybujících se elektronů, pokud odevzdají svou energii vnitřní slupce atomového obalu, čímž dojde k excitaci nebo ionizaci. Následný návrat do základního stavu je spojen s vyzářením fotonu charakteristického rentgenového záření. Energie závisí na materiálu terče a nezávisí na rychlosti elektronu.

Ionizující záření může s látkou interagovat přímo či nepřímo. Přímá ionizace je způsobena coulombickou interakcí elektricky nabitých částic. Nepřímá ionizace je způsobena nenabitými částicemi tj. fotony a neutrony, které svou interakcí s atomy uvolňují přímo ionizující částice [4].

1.2 Interakce ionizujícího záření s látkou

1.2.1 Fotoelektrický jev

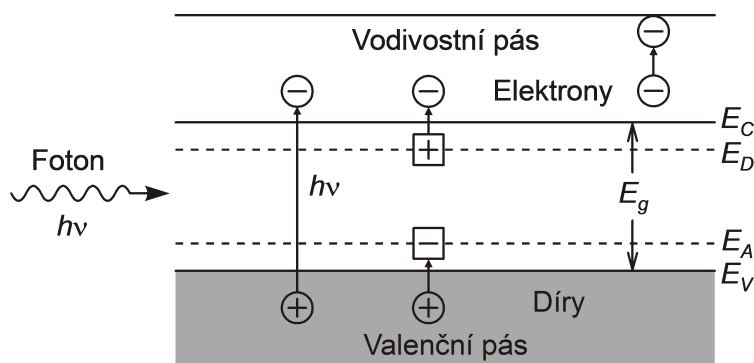
Fotoelektrický jev (fotoefekt) je jev, při kterém elektrony v látce přecházejí na vyšší energetickou hladinu v důsledku absorpce elektromagnetického záření (pokud přitom elektrony zůstanou v materiálu jedná se o *vnitřní fotoefekt*, pokud opustí materiál jedná se o *vnější fotoefekt*).

1.2.1.1 Vnitřní fotoefekt

Pokud dopadající záření nemá dostatečnou energii pro emisi elektronů z povrchu látky, může způsobit vnitřní elektronové přechody, během nichž se fotoexcitací uvolní elektrony nebo díry, ale zůstanou uvnitř látky. Přiložením elektrického pole vzniká *fotovodivost*. Elektronové přechody rozdělujeme tímto způsobem [5]:

1. *vlastní (intrinzické)* - vlastní fotovodivost v důsledku excitace elektronů z valenčního do vodivostního pásu polovodiče
2. *příměšové* - nevlastní fotovodivost v důsledku excitace elektronů z valenčního pásu na akceptorovou hladinu nebo excitace elektronů z donorové hladiny do vodivostního pásu
3. *založené na interakci s volnými nosiči* - excitace elektronů mezi hladinami ve vodivostním pásu

Schematické znázornění vnitřního fotoefektu je na obrázku 1.1, kde je v levé části zobrazen dopadající foton s energií $E = h\nu$, kde h je Planckova konstanta, ν je frekvence fotonu. Elektron resp. díra je označen kruhem, uvnitř kterého je zn. mínus resp. plus. Akceptor resp. donor je označen čtvercem, uvnitř kterého je zn. mínus resp. plus. Energie valenčního pásu je označena E_V , vodivostního pásu E_C . Energie akceptorové hladiny resp. donorové hladiny je označena E_A resp. E_D . Šířka zakázaného pásu energií je $E_g = E_C - E_V$. Elektronový přechod je vyznačen šipkou směřující od nižší energetické hladiny po vyšší. Výše popsanému rozdělení elektronových přechodů odpovídají tři šipkou znázorněné přechody zleva doprava: vlastní, příměšové a přechod mezi hladinami ve vodivostním pásu.



Obrázek 1.1: Vnitřní fotoefekt [5]

1.2.1.2 Vnější fotoefekt

Pokud má dopadající záření dostatečnou energii, může dojít překonáním povrchové bariéry k emisi elektronů z povrchu látky do okolního prostoru - *fotoemisi*. Schematické znázornění vnějšího fotoefektu je na obrázku 1.2, kde je zobrazeno porovnání vnějšího fotoefektu kovu a polovodiče.

V případě vnějšího fotoefektu pro kov platí vztah [5]:

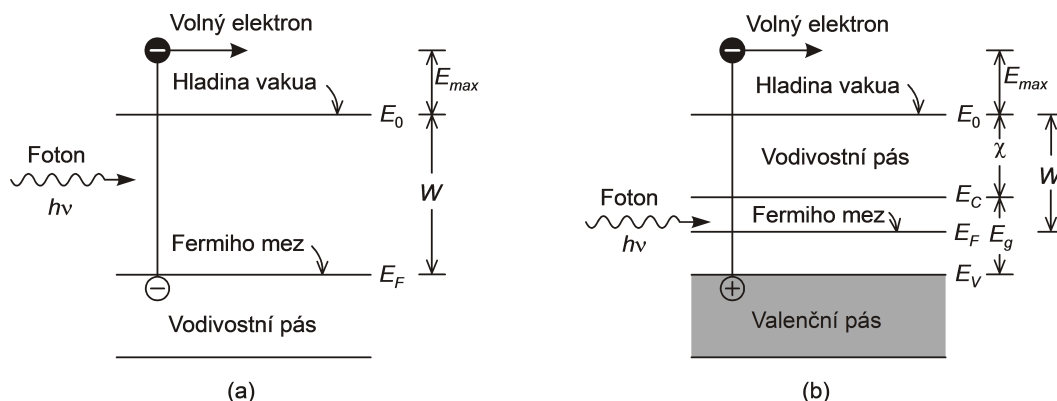
$$E_{max} = h\nu - W, \quad (1.1)$$

kde E_{max} je energie volného elektronu, který před emisí ležel na Fermiho hladině (energetická hladina s 50% pravděpodobností obsazení pro teploty nad absolutní nulou, nejvyšší obsazená hladina při teplotě 0K [6]), $h\nu$ je energie dopadajícího fotonu, h je Planckova konstanta, ν je frekvence fotonu, W je *výstupní práce kovu* definovaná jako $W = E_0 - E_F$, kde E_0 je energie vakua a E_F je Fermiho hladina. Popsaný přechod elektronu je na obrázku 1.2 vlevo.

V případě vnějšího fotoefektu pro polovodič platí vztah [5]:

$$E_{max} = h\nu - (E_g + \chi), \quad (1.2)$$

kde E_g je šířka zakázaného pásu energií a χ je elektronová afinita polovodiče (rozdíl mezi klidovou energií elektronu ve vakuu E_0 a dnem vodivostního pásu). Popsaný přechod elektronu je na obrázku 1.2 vpravo, kde W je *výstupní práce polovodiče* definovaná jako $W = E_0 - E_F$, zbytek označení odpovídá tomu v obrázku 1.1.



Obrázek 1.2: Vnější fotoefekt pro kov (vlevo) a polovodič (vpravo) [5]

1.2.2 Comptonův jev

Comptonův jev je děj, při kterém se foton sráží s elektronem, foton se odráží s menší energií a jiným směrem. Jde o nepružnou srážku, při níž foton předá část své energie elektronu. Pro Comptonův jev platí vztah [4]:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}, \quad (1.3)$$

kde h je Planckova konstanta, ν' je frekvence fotonu po dopadu, ν je frekvence fotonu před dopadem, m_0c^2 je klidová hmotnost elektronu (0,511MeV) a θ je úhel dopadu.

1.2.3 Vznik elektron-pozitronového páru

Jestliže se foton, jehož energie překročí klidovou hmotnost elektronu a pozitronu (1.024MeV), přiblíží k atomovému jádru, může mu předat svou energii na vytvoření elektron-pozitronového páru.

1.3 Detekce ionizujícího záření polovodičovými detektory

Detekce ionizujícího záření je založena na interakci záření s hmotou, obecný princip detekce těchto zařízení je popsán v [4]. V polovodičových detektorech se uplatňuje zejména vnitřní fotoelektrický jev, při kterém se v polovodiči vytvoří elektron-děrové ($e - h$) páry, které zvýší vodivost detektoru. Pokud na polovodič přiložíme elektrické napětí, je ionizací vzniklý náboj sbírán elektrickým polem v detektoru. Parametrem charakterizujícím tento proces je doba sběru náboje t_c (collection time), který může být u polovodičových detektorů několik desítek až stovek nanosekund, zatímco u plynových detektorů i několik milisekund [4]. Doba sběru náboje je ovlivněna zejména pohyblivostí nosičů náboje μ , ale i na vzdálenosti, kterou nosiče náboje projdou, než dorazí k elektrodám. Po dobu pohybu náboje teče detektorem proud, pro který platí:

$$\int_0^{t_c} I(t)dt = Q_c, \quad (1.4)$$

kde $I(t)$ je proud tekoucí detektorem a Q_c je celkový sebraný náboj za dobu sběru náboje t_c . Výpočet elektrického proudu daného pohybujícím se elektrickým nábojem umožňuje tzv. Schockleyho-Ramův teorém (viz [4]). Mezi další výhodu polovodičových detektorů patří malá energie ($3 - 5\text{eV}$) nutná pro vytvoření elektron-děrového páru (tato energie závisí na šířce zakázaného pásu E_g , která je u polovodičů řádově jednotky eV , což vede k vytvoření značného množství nosičů náboje) v porovnání s plynovým detektorem ionizujícího záření.

1.3.1 Požadavky na parametry polovodičového detektoru

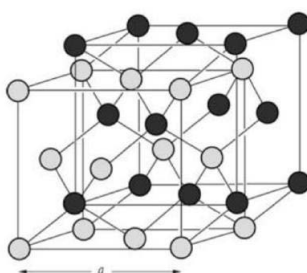
Mezi hlavní požadavky na parametry polovodičového detektoru RTG a γ záření patří:

1. vysoké protonové číslo Z , s jehož růstem se výrazně zvyšuje pravděpodobnost fotoefektu (roste s Z^{4-5} [4])
2. vysoká objemová hustota materiálu (vysoký absorpční koeficient)
3. vysoký měrný odpor ρ , což umožňuje přiložit vysoké napětí při malém tekoucím proudu detektorem, což zkracuje dobu sběru náboje
4. velká šířka zakázaného pásu E_g , která je potřeba k potlačení tepelného šumu detektoru (Si, Ge detektory mají malou šířku zakázaného pásu (viz tabulka 1.1), a proto je třeba je chladit na teplotu kapalného dusíku)
5. vysoký součin pohyblivosti a doby života nosičů náboje $\mu\tau$, který charakterizuje efektivnost přenosu náboje uvnitř detektoru

Přehled parametrů za pokojové teploty pro vybrané polovodiče viz tabulka 1.1, kde μ_e je pohyblivost elektronů, E_g je šířka zakázaného pásu energií, Z je protonové číslo.

1.3.2 (CdZn)Te

Telurid kadmato-zinečnatý (CZT) je směsný polovodič II-VI. Krystaluje ve sfaleritové plošně centrované krystalové struktuře s prostorovou grupou F-43m [7]. Grafické znázornění struktury je na obrázku 1.3. Jedná se o přímý polovodič s šířkou zakázaného pásu v rozmezí $E_g \approx 1.5 - 2.3\text{eV}$ při teplotě 300K. Šířka zakázaného pásu roste s množstvím zinku v materiálu. Tento materiál má oproti křemíku řádově větší měrný odpor, což umožňuje vyrobit fotoodpor bez nutnosti PN přechodu. Dále má CZT větší absorpční schopnost díky vyššímu protonovému číslu (viz tabulka 1.1). Největší výhodou CZT je možnost pracovat za pokojové teploty. Detektor není třeba chladit, protože má vysokou hodnotu šířky zakázaného pásu a tedy není tolik ovlivněn tepelným šumem i při pokojové teplotě.



Obrázek 1.3: Sfaleritová krystalická struktura [7]

Tabulka 1.1: Přehled parametrů pro vybrané polovodiče [5]

materiál	Z	Hustota (g/cm^3)	E_g (eV)	μ_e (cm^2/Vs)
Si	14	2.328	1.12	1500
Ge	32	5.323	0.67	3900
GaAs	31+33	5.316	1.24	8500
CdTe	48+52	5.850	1.50	1000

1.4 Elektrické kontakty

Elektrické kontakty hrají spolu s materiálovými parametry (viz část 1.3.1) významnou roli na výslednou kvalitu detektoru [6]. Existují dva základní typy kovových kontaktů na polovodičích (MS struktura): lineární *Ohmický kontakt* a usměrňující *Schottkyho kontakt*. Ohmické kontakty neomezují proud v závislosti na jeho směru. Usměrňující kontakty obsahují na rozhraní kov-polovodič potenciálové bariéry, které generují oblast prostorového náboje (OPN) v polovodiči. Prostorový náboj omezuje injekci volných nosičů náboje v jednom směru a brání toku proudu ve směru druhém. Typ kontaktu je určen energetickými bariérami. Ty mohou vznikat jednak rozdílem výstupních prací kovu a polovodiče, existencí povrchových stavů, přítomností mezivrstvy oxidu a chemickou strukturou obou materiálů v kontaktu [8]. Základní rozdělení elektrických kontaktů bude demonstrováno na polovodiči typu N (pro polovodič typu P se uvedené nerovnosti výstupních prací obrátí). Energetické schéma odděleného kovu a polovodiče je na

obrázku 1.4, kde E označuje energii, q je velikost elektrického náboje, E_{FM} je Fermiho hladina pro kov, E_{FS} je Fermiho hladina pro polovodič, Φ_M je výstupní práce z kovu, Φ_S je výstupní práce z polovodiče, $\Phi_K = \Phi_M - \Phi_S$ je kontaktní potenciál, E_0 klidová energie elektronu ve vakuu, E_V energie valenčního pásu polovodiče, E_C energie vodivostního pásu polovodiče a χ je elektronová afinita polovodiče.

1.4.1 Ideální Ohmický kontakt

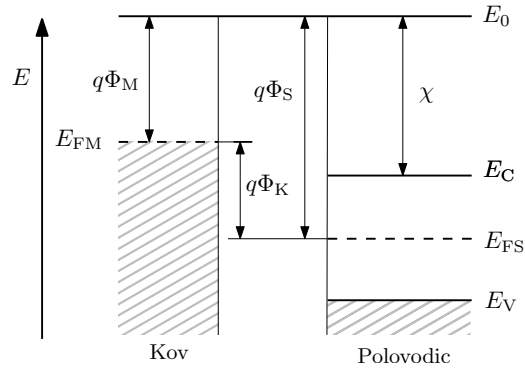
V kontaktu mezi kovem a polovodičem typu N, který má výstupní práci kovu menší než výstupní práci polovodiče, tzn. $\phi_M < \phi_S$ (což v obrázku 1.5 způsobí zahnutí energetických pásů polovodiče směrem dolů), existuje po přivedení napětí dostatečné množství volných elektronů pro obě polarizace napětí. Tyto elektrony jsou schopné přecházet v obou směrech mezi kovem a polovodičem. Volt-ampérová (V-A) charakteristika v tomto případě splňuje Ohmův zákon a je lineární pro obě polarizace [7]. Energetické schéma ideálního Ohmického kontaktu je na obrázku 1.5, kde E je energie, q velikost elektrického náboje, E_F je Fermiho hladina stejná pro kov i polovodič za termodynamické rovnováhy, Φ_M je výstupní práce z kovu, Φ_B je výška potenciálové bariéry mezi kovem a polovodičem, V_D je difúzní napětí, E_0 klidová energie elektronu ve vakuu, E_V energie valenčního pásu polovodiče, E_C energie vodivostního pásu polovodiče a χ je elektronová afinita polovodiče. Pro výšku potenciálové bariéry Φ_B platí vztah [7]

$$q\Phi_B = q\Phi_M - \chi \quad (1.5)$$

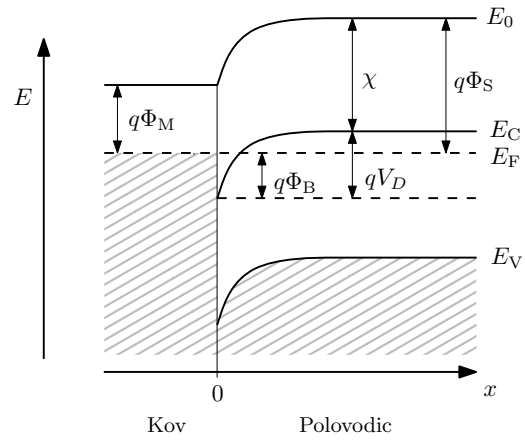
1.4.2 Ideální Schottkyho kontakt

V kontaktu mezi kovem a polovodičem typu N, který má výstupní práci kovu větší než výstupní práci polovodiče, tzn. $\phi_M > \phi_S$ (což v obrázku 1.6 způsobí zahnutí energetických pásů polovodiče směrem nahoru), dojde ke vzniku potenciálové bariéry (Schottkyho bariéra, jejíž výška Φ_B je ovlivněna Schottkyho jevem viz [6]), která je tvořena přítomností nehybného prostorového náboje v OPN šířky w . Pokud přivedeme napětí na Schottkyho kontakt s kladným potenciálem na polovodiči, dojde vlivem změny pásové struktury k potlačení difúzního proudu z polovodiče a celkový proud bude dán pouze malým driftovým proudem tvořený (e-h) páry z OPN polovodiče, tomuto zapojení Schottkyho kontaktu se říká polarizace v *závěrném směru*. Pokud přivedeme napětí na Schottkyho kontakt s kladným potenciálem na kovu a záporným na polovodiči, dojde ke snížení šířky OPN a tím ke zmenšení potenciálové bariéry. Díky tomu mohou procházet elektrony z polovodiče do kovu emisně-difúzním procesem [6]. Tomuto zapojení se říká polarizace v *propustném směru*. Situace je analogická i pro polovodič typu P, pouze se obrátí znaménko polarizace přivedeného napětí. Energetické schéma ideálního Schottkyho kontaktu na polovodiči typu N je na obrázku 1.6, kde E je energie, q velikost elektrického náboje, E_F je Fermiho hladina stejná pro kov i polovodič za termodynamické rovnováhy, Φ_M je výstupní práce z kovu, Φ_B je výška potenciálové bariéry mezi kovem a polovodičem, V_D je difúzní napětí, E_0 klidová energie elektronu ve vakuu, E_V energie valenčního pásu polovodiče, E_C energie vodivostního pásu polovodiče a χ je elektronová afinita polovodiče a w

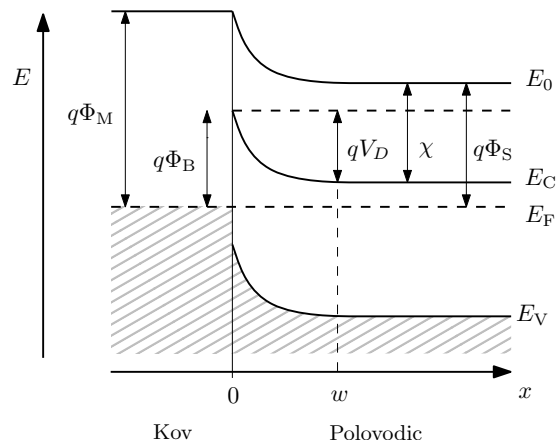
udává šířku OPN (oblast od 0 do w). Pro výšku potenciálové bariéry Φ_B platí stejný vztah jako (1.5).



Obrázek 1.4: Pásový diagram odděleného kovu (vlevo) a polovodiče (vpravo) pro $\Phi_M < \Phi_S$, překresleno z [6]



Obrázek 1.5: Pásový diagram MS struktury pro Ohmický kontakt, překresleno z [6]



Obrázek 1.6: Pásový diagram MS struktury pro Schottkyho kontakt, překresleno z [6]

1.4.3 Reálný kontakt kov-polovodič

Výše zmíněné typy kontaktů jsou pouze přiblížení reálné situaci. Platí pro nekonečný krystal, případně pro oblast konečného krystalu daleko od povrchu. Oblast blízko povrchu má jiné fyzikální vlastnosti než zbytek krystalu, protože zde dochází jednak k absorpci atomů z okolí, dále proto, že materiál není chemicky inertní a může dojít ke vzniku vrstvy produktů chemických reakcí (např. oxidy). Tato vrstva má ve většině případů semiizolační vlastnosti [7]. Dalším faktorem je přítomnost tzv. *povrchových stavů*. Jedná se o elektronové stavy na povrchu materiálu, které vznikají jako důsledek ostrého přechodu mezi materiálem (pevnou látkou) a okolním prostředím. Tyto stavy způsobují změny pásové struktury materiálu a s tím související změny vlastností materiálu u povrchu. Přítomnost povrchových stavů znemožňuje určit typ kontaktu pouze ze znalosti výstupních prací. Více se problematikou kontaktů zabývá [6].

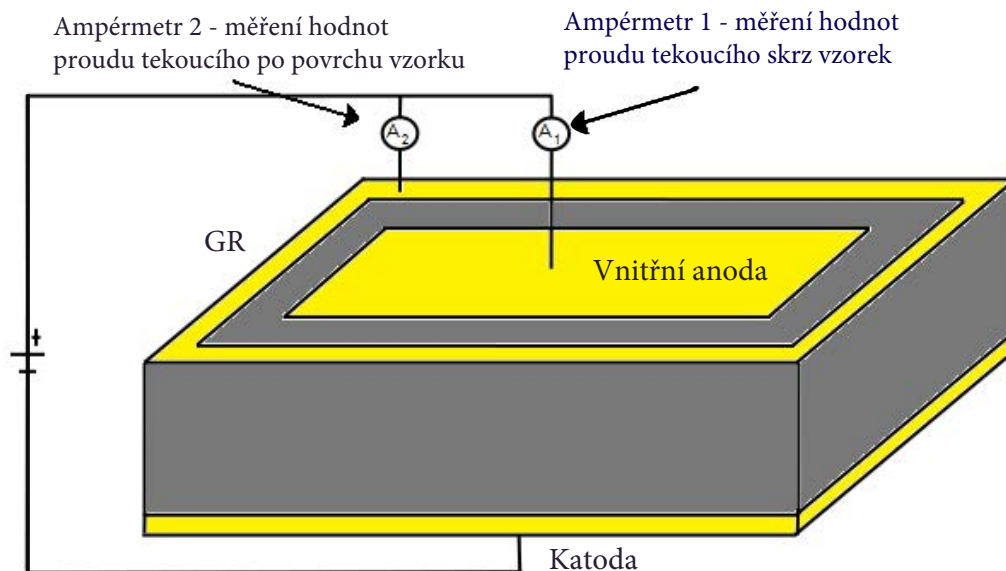
2. Experimentální část

2.1 Charakterizační metody

Charakterizační metody polovodičových detektorů můžeme v zásadě rozdělit na elektrické, optické a spektroskopické metody charakterizace. V následujících odstavcích budou uvedeny použité charakterizační metody.

2.1.1 V-A charakteristiky

V-A charakteristika je elektrická charakterizační metoda, při níž je na polovodičový detektor přivedeno napětí a měří se protékající elektrický proud. Při testování detektorů byly použity dva typy zapojení. První z nich je dvoubodové zapojení, kdy se na detektor s dvěma elektrickými kontakty připojí zdroj napětí a ampérmetr pro měření protékajícího proudu. Druhý typ zapojení bylo tzv. měření s guard ringem, při kterém je jedna elektroda opatřena ochrannou elektrodou - tzv. *guard ring* (GR) viz obrázek 2.1. Na ochranné i vnitřní elektrodě je stejný potenciál a proto mezi těmito elektrodami neteče žádný proud. Tímto je umožněna separace proudu tekoucího skrz vzorek a tzv. *svodového proudu* (proud, který teče po povrchu detektoru a snižuje tak detekční schopnosti detektoru). Předpokládáme, že GR sbírá všechny svodový proud. Šířka GR je přibližně 1mm a mezera mezi vnitřním kontaktem a GR je rovněž přibližně 1mm pro detektor s plochou $10\text{mm} \times 10\text{mm}$. To znamená, že vnitřní elektroda měla rozměry $6\text{mm} \times 6\text{mm}$.

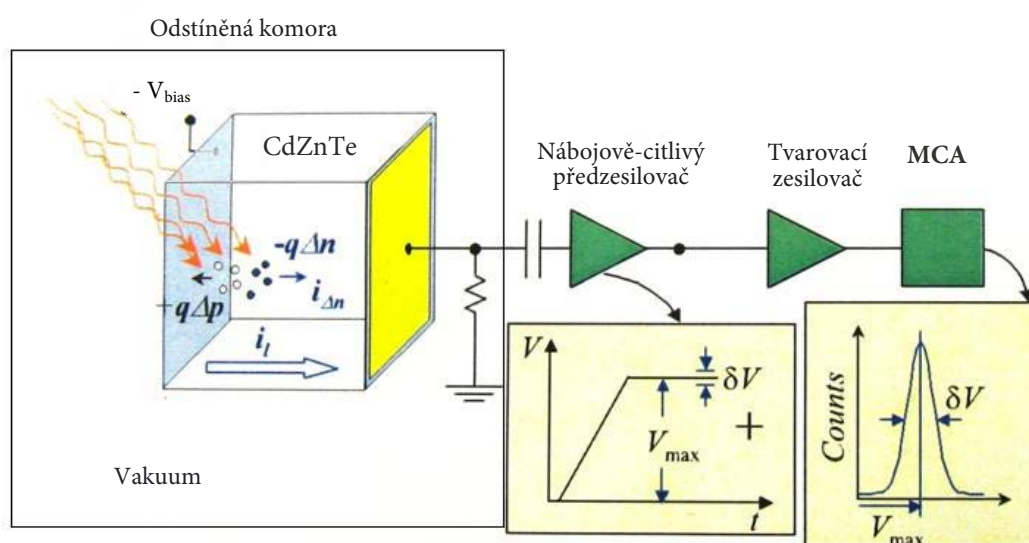


Obrázek 2.1: Schéma zapojení detektoru s GR [7]

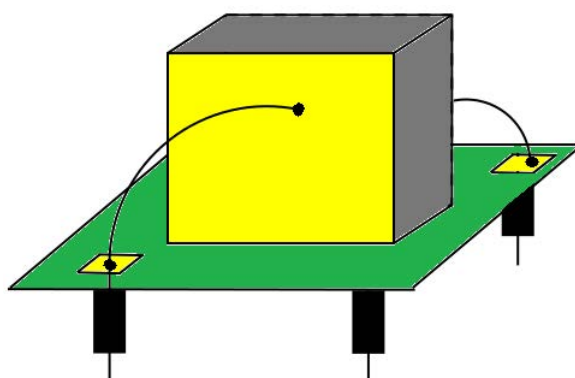
2.1.2 Standardní spektroskopická měření

Standardním spektroskopickým měřením rozumíme spektrální analýzu záření, které dopadá na detektor. Měřicí aparatura se skládá z odstíněné evakuované ko-

mory, nábojově-citlivého předzesilovače, tvarovacího zesilovače, multikanálového analyzátoru (MCA) a počítače s programem Maestro od firmy Ortec (tento program umožňuje ukládat a analyzovat spektra) a zdroje napětí. Schéma aparatury je na obrázku 2.2, kde výstup z MCA se zobrazuje na počítači pomocí programu Maestro. Tento výstup se poté převede na závislost počtu záznamů (counts) na daném kanálu (channel). Vzorek opatřený podložkou (znázorněno na obrázku 2.3) je umístěn do odstíněné komory. Jedna elektroda je vždy uzemněna a na druhou je přivedeno požadované napětí. Na stranu s kovovou katodou je přiložen daný zářič. Záření, které dopadá na detektor v něm generuje (e-h) páry, ty jsou příloženým polem roztrženy a driftnou k příslušným elektrodám. To způsobí napěťový impuls $V(t)$, který je zesílen nábojově citlivým předzesilovačem a přetvarován tvarovacím zesilovačem. Výsledný pulz je zpracován v MCA, což je znázorněno na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Schéma aparatury na měření radiačních spekter [7]



Obrázek 2.3: Schéma nakontaktovaného vzorku upevněného na podložce [7]

2.1.3 Hechtova relace a určení $\mu\tau$

Pokud je vnitřní elektrické pole detektoru konstantní, lze pro sebraný náboj Q_m použít tzv. *Hechtovu relaci*, danou rovnicí [7]:

$$Q_m = Q_0 \left\{ \frac{v_h \tau_h}{L} \left(1 - \exp \left[\frac{-x_i}{v_h \tau_h} \right] \right) + \frac{v_e \tau_e}{L} \left(1 - \exp \left[\frac{x_i - L}{v_e \tau_e} \right] \right) \right\}, \quad (2.1)$$

kde, Q_m je indukovaný náboj vytvořený pohybem fotogenerovaných nosičů v detektoru, Q_0 je maximální náboj, který je možné vytvořit dopadajícím zářením s energií E_γ , v je rychlost, τ doba života, L je tloušťka vzorku a x_i je poloha, kde se v detektoru absorbuje záření. Dolní index h označuje veličinu týkající se díry a e elektronu. Podíl Q_m a Q_0 představuje účinnost sběru náboje CCE (z angl. charge collection efficiency). CCE je definována vztahem [5]:

$$CCE = \frac{Q_m}{Q_0} 100\% \quad Q_0 = e \frac{E_\gamma}{E_p}, \quad (2.2)$$

kde E_γ je energie dopadajícího záření, e je elementární náboj a E_p je energie potřebná na vytvoření jednoho ($e - h$) páru.

Použitím vztahů:

$$v = \mu E \quad a \quad E = \frac{U}{L}, \quad (2.3)$$

kde μ je pohyblivost, E je intenzita elektrického pole a U je napětí, rovnice (2.1) získá tvar:

$$Q_m = Q_0 \left\{ \frac{\mu_h \tau_h U}{L^2} \left(1 - \exp \left[\frac{-x_i L}{\mu_h \tau_h U} \right] \right) + \frac{\mu_e \tau_e U}{L^2} \left(1 - \exp \left[\frac{x_i L - L^2}{\mu_e \tau_e U} \right] \right) \right\} \quad (2.4)$$

Pokud se záření pohltí v malé hloubce pod povrchem ($x_i \approx 0$), lze v rovnici 2.4 zanedbat příspěvek od děr a rovnici zjednodušit na Hechtovu relaci pro jeden typ nosiče elektrického náboje (elektrony):

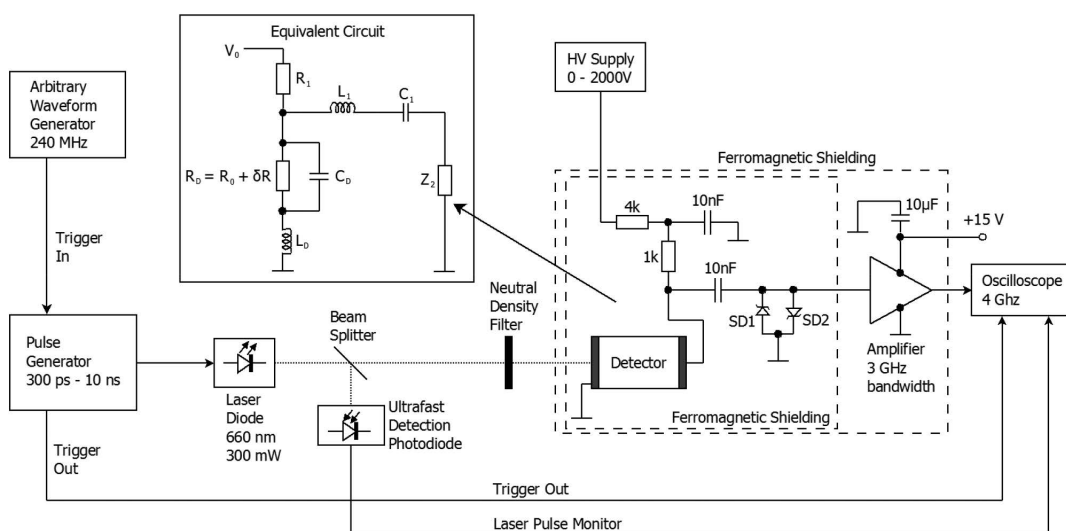
$$Q_m = Q_0 \frac{\mu_e \tau_e U}{L^2} \left(1 - \exp \left[\frac{-L^2}{\mu_e \tau_e U} \right] \right). \quad (2.5)$$

Výše uvedené vztahy umožňují (za podmínek jejich platnosti) nafiťováním experimentálně změřené závislosti $Q_m(U)$ určit součin pohyblivosti a doby života $\mu\tau$. Experimentální závislost Q_m na napětí může být získána ze změřených spekter (viz část 2.1.2), kdy pro Q_m použijeme polohu kanálu s maximálním počtem záznamů pro dané napětí. Hechtova relace ve tvaru (2.5) obsahuje mimo tloušťky detektoru L pouze jednu materiálovou veličinu (součin pohyblivosti a doby života nosičů náboje $\mu\tau$) a konstantu Q_0 . Pokud vnitřní elektrické pole detektoru není konstantní, tzn. detektor je polarizovaný přítomností prostorového náboje, je nutné udělat korekci Hechtovy relace [9].

2.1.4 Měření tranzientních proudů - TCT

Měření tranzientních proudů (angl. Transient-Current Technique - TCT) je metoda umožňující určit transportní vlastnosti detektoru a profil jeho vnitřního

elektrického pole. Tato metoda je založena na ozáření detektoru zdrojem záření (buď laserová dioda nebo zdroj ionizujícího záření) při přiloženém napětí na detektoru a měření časových závislostí elektrického proudu. Schéma měřící aparatury je na obrázku 2.4. Vzorek připevněný k podložce je umístěn do odstíněné komory. Jedna elektroda je vždy uzemněna a na druhou je přivedeno požadované napětí. V komoře je malý otvor určený pro přivedení optického svazku (v případě měření se zářičem je zářič umístěn přímo v odstíněné komoře). V obou případech je záření přivedeno na katodu pro měření signálu elektronů (pro měření děr se pouze změní polarita napětí, nikoli poloha zářiče). Záření dopadající na detektor generuje (e-h) páry, které jsou přivedeným elektrickým polem unášeny k elektrodám. Nosiče náboje svým pohybem skrz vzorek vytváří proudový impulz, ten je převeden na napěťový pulz a zaznamenán digitálním osciloskopem, který je spojen s počítačem. Samotné měření spočívá v záznamu mnoha impulzů a jejich následném přeprůměrování z důvodu potlačení šumu. Modelový průběh časové závislosti proudu je na obrázku 2.5, kde I je proud, t čas a t_r odpovídá tranzit time (definovaný níže). Příklad (A) odpovídá časovému průběhu proudu, pokud není přítomen *trapping* neboli záchyt náboje na vnitřních potenciálových pastech, v případě (B) je znázorněn průběh proudové závislosti pokud dochází k *trappingu*, ale nedochází k *detrappingu* (uvolnění náboje z pastí). Podrobněji se touto problematikou zabývá např. [10].

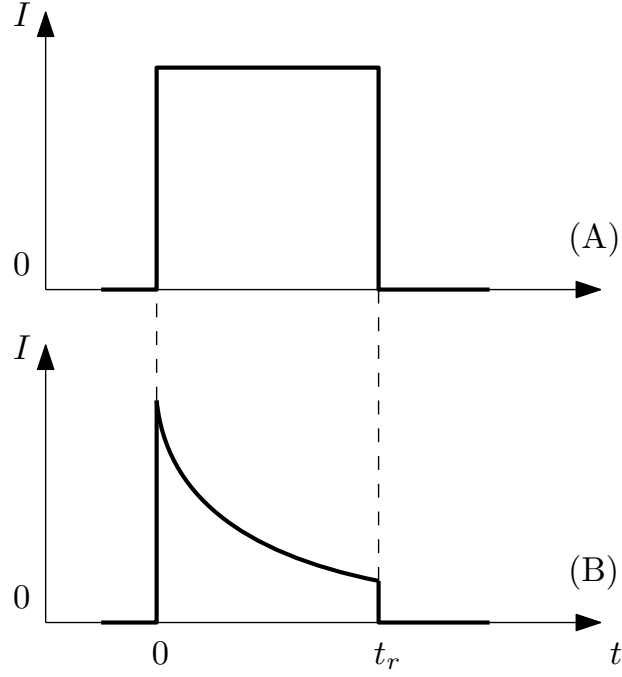


Obrázek 2.4: Schéma aparatury na měření TCT [11]

2.1.4.1 Určení elektrických a transportních parametrů

Jeden z nejdůležitějších parametrů TCT je *tranzit time* t_r (doba průchodu), což je čas, za který nosiče náboje projdou vlivem elektrického pole od jedné elektrody ke druhé, v případě generace nosičů náboje blízko elektrody. V jednoduchém případě, kdy TCT pulz má tvar jako je na obrázku 2.5, lze určit tranzit time přímo z rozdílu času náběžné a sestupné hrany pulzu. V případě, že má pulz jiný tvar, je nutné použít jiné metodiky (viz např [10]).

Důležitým parametrem je i profil vnitřního elektrického pole detektoru. CCE je na profilu pole silně závislá, protože pohyb nosiče náboje uvnitř detektoru je



Obrázek 2.5: Modelové ukázky časových proudových závislostí, překresleno z [10]

ovlivněn profilem vnitřního elektrického pole. Pokud totiž vnitřní elektrické pole v detektoru degraduje, může se v detektoru objevit oblast s nízkou hodnotou sběru náboje, což vede ke zhoršení detekčních schopností detektoru. S klesající hodnotou elektrického pole narůstá počet zachycených fotogenerovaných nosičů náboje (trapping), což se projeví vznikem prostorového náboje. Prostorový náboj může způsobit vznik neaktivní oblasti s nulovým elektrickým polem, to dále omezí CCE detektoru. V případě, že je profil vnitřního elektrického pole lineární, platí [9] tyto následující vztahy:

$$E(x) = E_0 - ax \geq 0, \quad (2.6)$$

kde $x = 0$ označuje polohu katody (viz obrázek 2.6), E_0 je elektrické pole pod ozářenou katodou, a je sklon závislosti elektrického pole způsobený konstantní prostorovou nábojovou hustotou N , která se spočte ze vztahu:

$$a = \frac{eN}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}, \quad (2.7)$$

kde ε_0 je permitivita vakua, ε_r je relativní permitivita polovodiče a e je elementární náboj. Profil vnitřního pole vzorku je schematicky znázorněn na obrázku 2.6. Výpočet parametru a lze provést fitováním změřeného časového průběhu elektrického proudu. Fitovaný vztah pro elektrický proud v detektoru $i(t)$ je dán [9] vztahem:

$$i(t) = \frac{Q_0 E_0 \mu}{L} \exp\left(-\left(a + \frac{1}{\mu\tau}\right) \mu t\right) \propto \exp(-ct), \quad (2.8)$$

kde Q_0 je počáteční fotogenerovaný náboj uvnitř detektoru, E_0 je elektrické pole pod ozářenou katodou, μ je konstantní pohyblivost elektronů, τ je doba života

elektronů, L je vzdálenost planárních elektrod (tloušťka detektoru), t je čas a c je parametr exponenciálního poklesu, daný vztahem:

$$c = \left(a + \frac{1}{\mu\tau} \right) \mu. \quad (2.9)$$

Tento vztah umožňuje výpočet parametru a (a tím sklon vnitřního elektrického pole uvnitř detektoru), pokud je znám součin $\mu\tau$. Ten lze určit např. ze spektrální analýzy pomocí Hechtovy relace (viz část 2.1.3). Polohu neaktivní oblasti detektoru W (viz obrázek 2.6) lze určit ze vztahu:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r U}{eN}} \leq L, \quad (2.10)$$

pokud je $W < L$, pak uvnitř detektoru existuje neaktivní zóna (což je případ na obrázku 2.6), ten ukazuje případ, kdy je vzorek silně polarizován a tranzit time t_r nelze určit. V případě, kdy je $W \geq L$, platí pro napětí na detektoru U vztah:

$$U = E_0 L - \frac{1}{2} a L^2. \quad (2.11)$$

Tranzit time t_r se spočítá z rozdílu časů náběžné a sestupné hrany pulzu (viz obrázek 2.5), pro t_r zároveň platí vztah:

$$\frac{E_0}{a} (1 - \exp(-a\mu t_r)) = L. \quad (2.12)$$

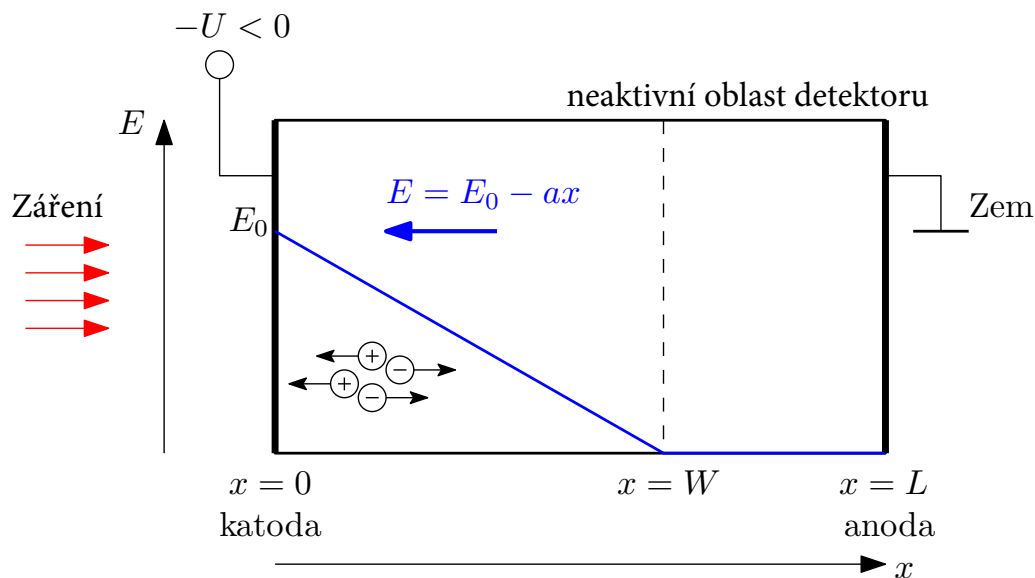
Parametr a se vypočítá numericky z transcendentní rovnice [9]:

$$ct_r = \left(1 + \frac{1}{a\mu\tau} \right) \ln \left(\frac{1 + \frac{aL^2}{2U}}{1 - \frac{aL^2}{2U}} \right), \quad (2.13)$$

přičemž všechny vyskytující se veličiny jsou buď dané (L), experimentálně získané ($\mu\tau$, c , t_r) nebo vypočítané z předcházejících vztahů. V tomto případě bylo možné vypočítat (na rozdíl od případu $W < L$) všechny parametry tedy: a , E_0 , μ . Grafické znázornění proudové závislosti s přítomným trappingem, kterému odpovídá exponenciální pokles proudu daný vztahem (2.8) je na obrázku 2.5 část B. Odvození daných vztahů spolu s dalšími podrobnostmi je v [9]. Za zmínku stojí, že k výpočtu pohyblivosti μ nelze použít vztah:

$$\mu = \frac{L^2}{t_r U}, \quad (2.14)$$

protože ten platí pouze pro konstantní elektrické pole uvnitř detektoru.



Obrázek 2.6: Schéma profilu elektrického pole E v detektoru, na který dopadá záření, překresleno z [9]

2.2 Příprava vzorku

Aby se z monokrystalického vzorku materiálu CZT stal detektor záření, je nutné provést následující úpravy.

2.2.1 Řezání vzorku

Pro získání vzorku s požadovaným rozměrem je nutné nejprve vyříznout hrubý tvar pomocí pily s diamantovým drátem a pak pomocí drátové pily (ocelový drát + brusivo) upravit vzorek do požadovaného tvaru. Při řezání je vzorek upevněn na podložce pomocí speciálního vosku. Vosk je před následným zpracováním nutné ze vzorku odstranit pomocí oplachu v xylenu a potom v acetonu, načež následuje osušení proudem stlačeného vzduchu.

2.2.2 Broušení vzorku

Povrch získaného vzorku je pro nanesení kontaktů příliš hrubý a protější stěny vzorku nejsou planparalelní, proto je zapotřebí vzorek obrousit. Obroušení vzorku se provádí nejprve pomocí hrubého brusiva SiC s hrubostí 800 (velikost zrna $7 - 10\mu\text{m}$) v destilované vodě a následně brusivem s hrubostí 1200 (velikost zrna $3 - 5\mu\text{m}$) na standardním přípravku tak, aby byly protější stěny planparalelní. Následuje broušení korundem 304 (velikost zrna $3 - 5\mu\text{m}$) z důvodu většího zahlázení povrchu a také pro zarovnání hran. Faktorem ovlivňujícím kvalitu povrchu vzorku je zejména hrubost brusiva, velikost přítlaku (ovlivňující míru poškrábání povrchu) a také způsob broušení (pohyb se vzorkem ve tvaru čísla 8 a občasná změna natočení vzorku v ruce).

2.2.3 Mechanické leštění vzorku

Mechanické leštění vzorku probíhá na standardní leštící soupravě (skleněná deska s nalepeným jemným hadrem), na které se vzorek leští v destilované vodě s $1\mu\text{m Al}_2\text{O}_3$, dokud není docílen požadovaný lesk a hladkost povrchu. Poté je provedeno mytí vzorku v ultrazvukové pračce (UZ), které je následované oplachem v acetonu a osušením stlačeným vzduchem. V případě, kdy se během procesu vzorek poškodí (např. v UZ upadne část rohu vzorku), je potřeba zopakovat předchozí kroky pro docílení požadovaného tvaru.

2.2.4 Chemické leptání

Leptání vzorku probíhá po dobu 1 minuty v 3% roztoku brom-metanolu (Br-MeOH) z důvodu odstranění poškozené povrchové vrstvy po broušení a leštění a také k dalšímu zahlazení povrchu. Pokud by porušená vrstva nebyla odstraněna před nanesením kontaktu, došlo by jejím vlivem k vytvoření potenciálových bariér na povrchu vzorku a tím by mohlo dojít ke vzniku usměrňujícího kontaktu [8]. Poté se vzorek opláchne ve třech miskách po sobě s čistým metanolem (MeOH), v každé po dobu přibližně 10 s. Poslední část je oplach v isopropanolu a osušení proudem stlačeného vzduchu. Takto upravený vzorek je připraven na nanesení kovových kontaktů.

2.2.5 Nanesení kovových kontaktů

Vzorek se nejprve upevní pomocí fotorezistu (organický lak) na leštěnou křemíkovou destičku. Boky vzorku se v případě nanášení zlatého kontaktu připraveného z 1% roztoku chloridu zlatitého (AuCl_3) ve vodě (vodní kontakty) pokryjí fotorezistem. Při použití zlatých kontaktů připravených z alkoholového roztoku připraveného z 1% AuCl_3 v MeOH (alkoholové kontakty) se místo fotorezistu použije speciální ochranný lak, protože fotorezist se v MeOH rozpouští. Jinak je příprava stejná jako pro vodní kontakty. V případě, že se nanáší struktura GR (viz část 2.1.1), je nutné namaskovat fotorezistem resp. ochranným lakem i tu část kontaktu ve které se nachází mezera mezi vnitřním kontaktem a GR strukturou. Namaskovaný vzorek se nechá v pídce vyhřát při teplotě cca $60\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 30 minut. Na takto připravený vzorek se nechají vysrážet kovové kontakty (z vodního nebo alkoholového roztoku) po dobu 1 minuty, pak se vzorek opláchne v destilované vodě resp. MeOH, ve třech miskách acetonu resp. toluenu se rozpustí fotorezist resp. ochranný lak. Nakonec se vzorek opláchne v isopropanolu a osuší proudem stlačeného vzduchu. Totéž se v případě nanášení alkoholových kontaktů opakuje pro druhý kontakt, protože se kvůli vlastnostem ochranného laku nedá přilepit vzorek na bok, což znemožňuje nanesení obou kontaktů najednou. Poté následuje odlepení vzorku z podložky v teflonové misce s acetonem resp. toluenem a oplachem v dalších dvou miskách s acetonem resp. toluenem. To zajistí důkladné odstranění fotorezistu resp. ochranného laku. Nakonec se provede osušení vzorku proudem stlačeného vzduchu.

2.2.6 Odstranění kovových kontaktů

Aby bylo možné porovnat vliv alkoholových a vodních kontaktů, je potřeba daný kontakt odstranit před nanesením dalšího. To se provádí tak, že se nejprve vzorek leští na standardní leštící soupravě (stejně jako při mechanickém leštění po broušení vzorku - viz část 2.2.3). Tím je zaručeno odstranění kontaktu bez použití chemického leptání, které by způsobilo nerovnoměrné odstraňování kontaktu a zapříčinilo by vznik nerovností v oblasti kde byl kontakt. Po mechanickém leštění již lze aplikovat chemické leptání pro další zahlazení povrchu. Tímto procesem je opakovaně získána stejná kvalita povrchu pro následné nanášení kontaktů.

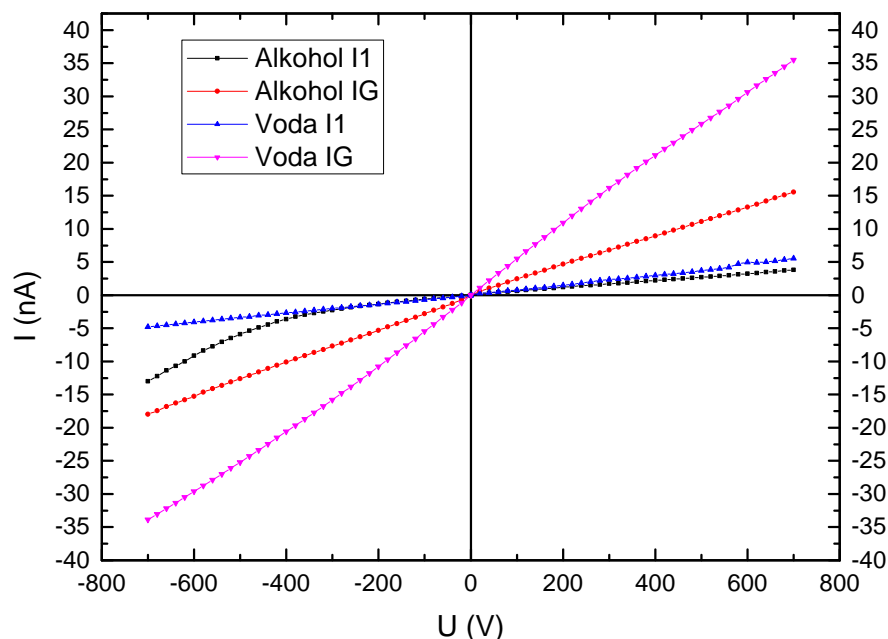
3. Výsledky měření a diskuze

3.1 Příprava vzorku

K měření byl použit monokrystalický vzorek CZT s 10% obsahem Zn o rozměrech $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$. Vzorek byl koupen od firmy Redlen Technologies a bylo mu přiřazeno označení R306A. Povrch vzorku byl upraven postupem popsáním v části 2.2 a byly na něm nanесeny alkoholové kontakty se strukturou GR. Výsledná tloušťka vzorku po nanесení alkoholových kontaktů byla $L = 4445 \mu\text{m}$. Na takto připraveném detektoru byly změřeny V-A charakteristiky, spektrální analýza a TCT. Poté byly kontakty odstraněny, jak je popsáno v (2.2.6). Následovalo nanесení vodních kontaktů, přičemž tloušťka po nakontaktování byla $L = 4372 \mu\text{m}$. Poté byla provedena stejná charakterizace vzorku jako pro alkoholové kontakty. Kontakty byly poté znovu odstraněny a na detektor byly nanесeny alkoholové kontakty. Následnou charakterizací detektoru bylo ověřeno, že efekty způsobené alkoholovými kontakty jsou reprodukovatelné.

3.2 V-A charakteristiky

Volt-ampérová charakteristika byla provedena nejdříve orientačně pro stanovení kvality kontaktů resp. jestli se zlato nenaneslo i na boky vzorku, což by způsobilo velkou hodnotu svodových proudů a znehodnotilo vzorek. Pokud se to stane, je nutné vzorek obrousit a opakovat kroky s leptáním a nanесením kontaktů (viz část 2.2). Poté, co jsou známy mezní hodnoty proudu (v řádu 10 až 100 nA), se změní podrobná V-A charakteristika pro alkoholové a vodní kontakty. Porovnání V-A charakteristik pro alkoholové a vodní kontakty je znázorněno na obrázku 3.1, kde *Alkohol* označuje hodnotu proudu pro alkoholový kontakt a *Voda* označuje hodnotu proudu pro vodní kontakt. Označení *G* odpovídá proudu tekoucímu GR kontaktem (viz část 2.1.1) a *I* odpovídá proudu tekoucímu vnitřní elektrodou. Z obrázku 3.1 je vidět, že nanесení alkoholových kontaktů zapříčiňuje snížení svodových proudů v porovnání s vodními kontakty. Proud tekoucí vnitřní elektrodou se v blízkosti počátku neliší pro alkoholové a vodní kontakty a pro vyšší záporné napětí alkoholové kontakty vykazují injekční chování. Z V-A charakteristik vnitřní elektrody se pomocí lineární regrese v blízkosti počátku stanovil elektrický odpor $R = (1.4 \pm 0.1) \cdot 10^{11} \Omega$, měrný elektrický odpor $\rho = (3.2 \pm 0.5) \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$.



Obrázek 3.1: Porovnání V-A charakteristik alkoholových a vodních kontaktů

3.3 Spektrální analýza

Aparatura pro spektrální analýzu byla popsána v části 2.1.2. Nejprve byl použit α -zářič Am^{241} (Energie hlavní linie 5480keV, aktivita 8.4kBq), jehož spektrum se měřilo. Naměřená spektra jsou pro alkoholové kontakty na obrázku 3.2 a pro vodní kontakty na obrázku 3.3. Z těchto obrázků plyne, že pro napětí větší než 300V se jednotlivé píky příliš neliší, ale pro napětí nižší je zde vidět posun, to se projeví v Hechtově relaci. Porovnání píků pro napětí na detektoru $U = 600V$ je na obrázku 3.4, ze kterého je vidět, že se píky co se do výšky ani FWHM (plné šířky v polovině maxima) neliší. Relativní posun píku, který je 5 kanálů (v obrázcích označeno *channels*) lze vůči velikosti kanálu maxima zanedbat. Píky pro jednotlivé hodnoty napětí byly proloženy Gaussovou funkcí a polohy maxim byly vyneseny spolu s příslušným napětím do grafů Hechtovy relace, viz obrázek 3.5, kde je porovnání Hechtovy relace pro alkoholové a vodní kontakty. V tomto obrázku je vidět, že pro napětí větší než 300V se polohy maxim počtu událostí (v obrázcích spekter označeno jako *counts*) již výrazně neliší. Vypočítané hodnoty parametrů Hechtovy relace jsou v tabulce 3.1.

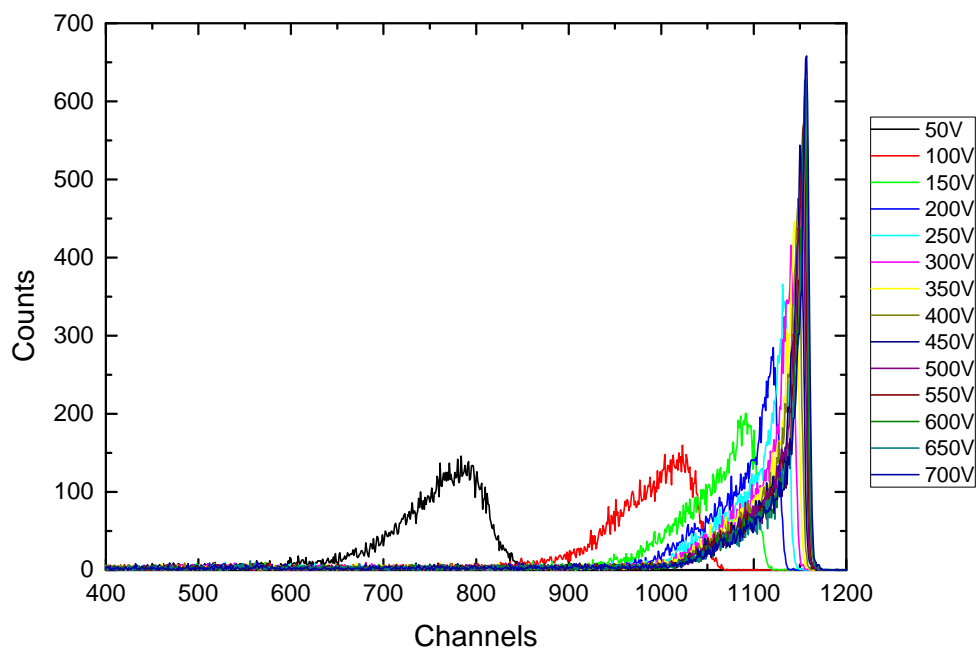
Stejně měření bylo provedeno rovněž pro gama zářič Am^{241} (Energie hlavní linie 59.6keV, aktivita 89kBq). Zaznamenaná spektra pro alkoholové kontakty jsou na obrázku 3.6, pro vodní kontakty 3.7. Porovnání pro napětí 500V je na obrázku 3.8, kde je vidět, že při tomto napětí se píky pro alkoholové a vodní kontakty neliší. Grafické znázornění Hechtovy relace je pro oba kontakty na obrázku 3.9, ve kterém jsou, jako v případě α spekter, pro napětí nižší než 300V menší hodnoty Hechtovy relace pro vodní kontakty. To souvisí s nižší hodnotou $\mu\tau$ pro vodní

kontakty. Z obrázku 3.9 je vidět, že hodnota Q_0 je pro oba typy kontaktů stejná (obě křivky se pro maximální napětí překrývají). Vypočítané hodnoty parametrů Hechtovy relace jsou v tabulce 3.1, kde pro alkoholové kontakty jsou označeny dolním indexem *Alkohol* a pro vodní *Voda*.

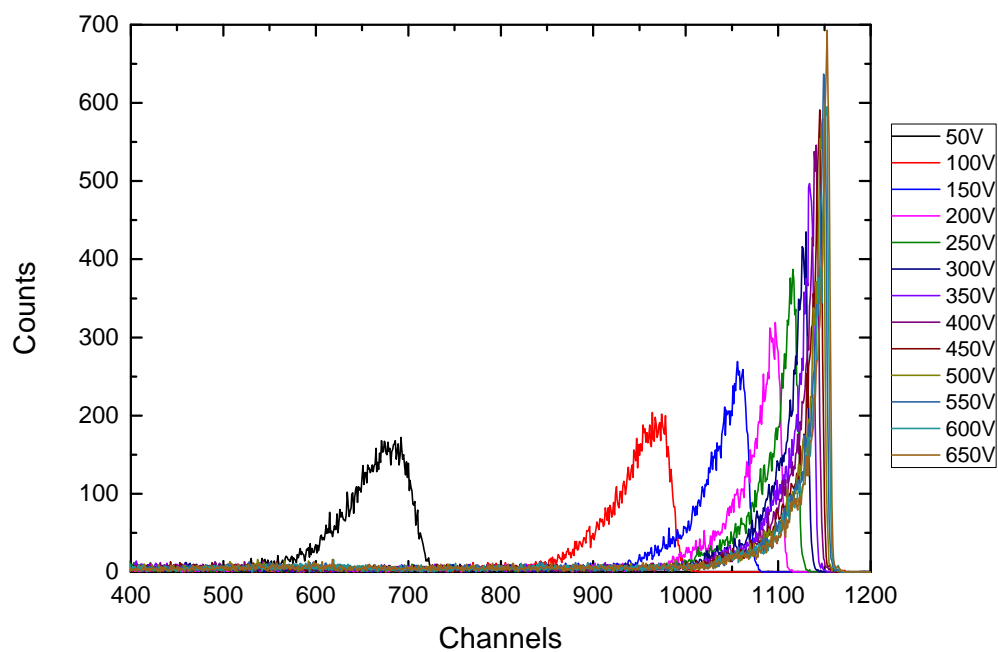
Porovnání Hechtových relací pro α -zářič a γ -zářič pro alkoholové a vodní kontakty je na obrázku 3.10. Vyšší hodnoty Hechtovy relace spolu s vyššími hodnotami $\mu\tau$ (v tabulce 3.1) pro γ -zářič mohou být způsobeny zahrnutím příspěvku děr do příspěvku elektronů, protože použitá Hechtova relace pro jeden typ nosiče (elektrony) (2.5) platí přesně pouze pro absorpci záření těsně pod elektrodou, což v případě γ -zářiče nenastává.

Tabulka 3.1: Hodnoty $\mu\tau$ pro alkoholové a vodní kontakty

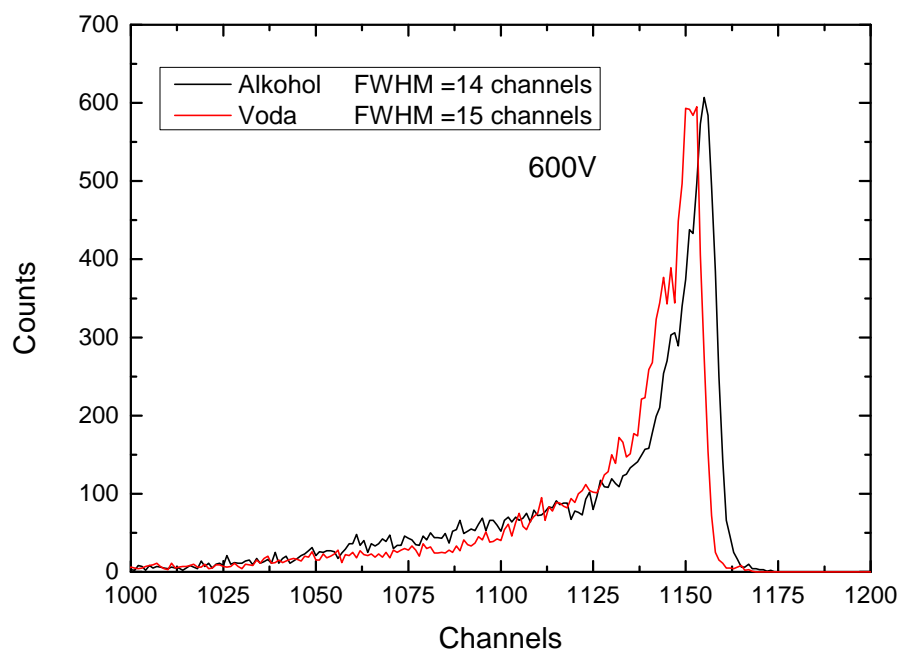
měření	$\mu\tau_{Alkohol} [\text{cm}^2/\text{V}]$	$\mu\tau_{Voda} [\text{cm}^2/\text{V}]$
α -spektra	0,005	0,003
γ -spektra	0,010	0,006



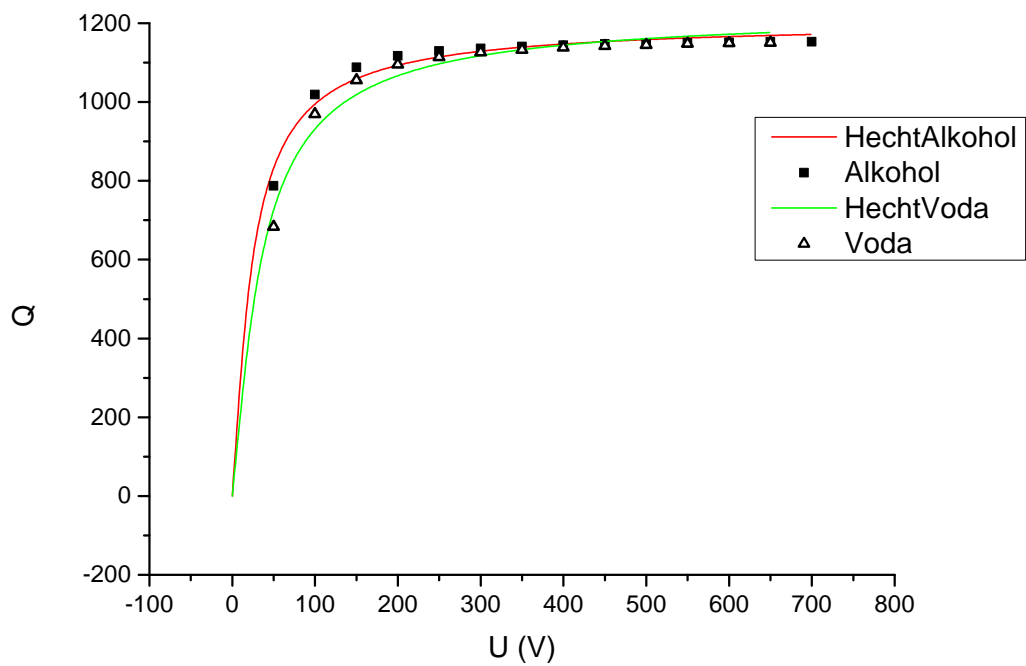
Obrázek 3.2: Spektrum α -zářiče Am^{241} pro alkoholové kontakty



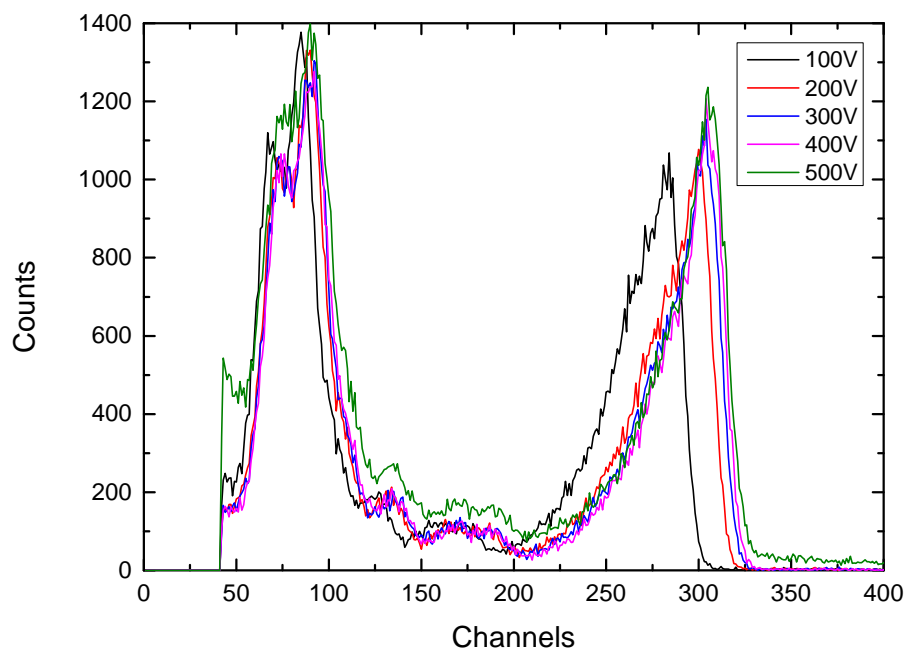
Obrázek 3.3: Spektrum α -zářiče Am^{241} pro vodní kontakty



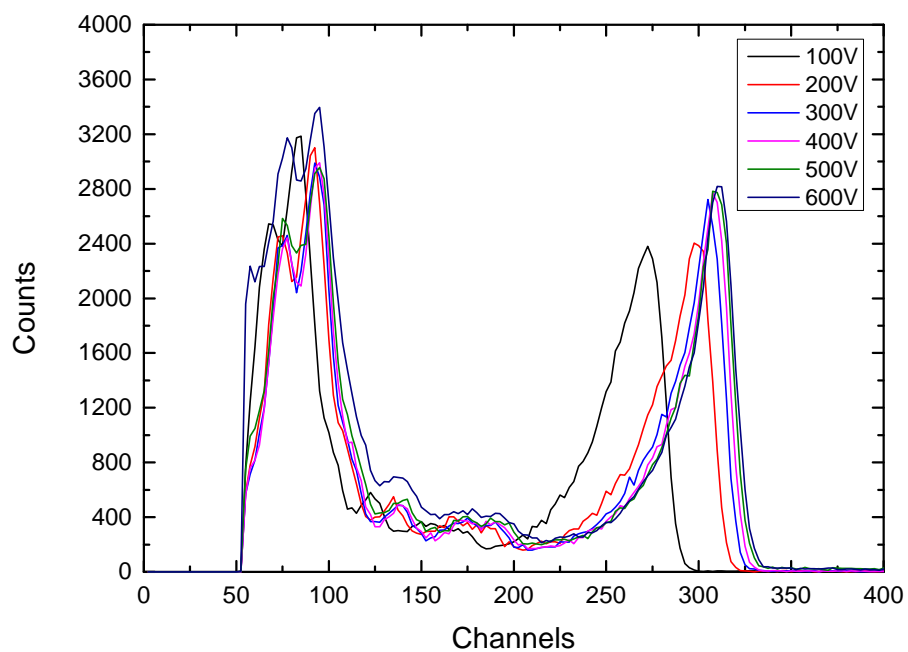
Obrázek 3.4: Spektrum α -zářiče Am^{241} - porovnání alkoholových a vodních kontaktů při napětí 600V



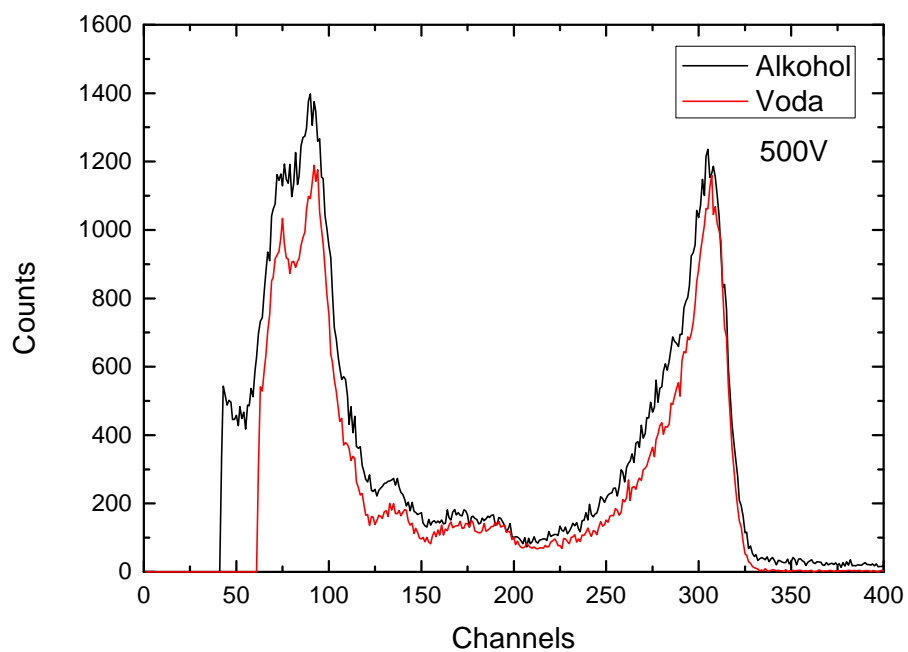
Obrázek 3.5: Srovnání Hechtovy relace pro α -zářič Am^{241} pro alkoholové a vodní kontakty



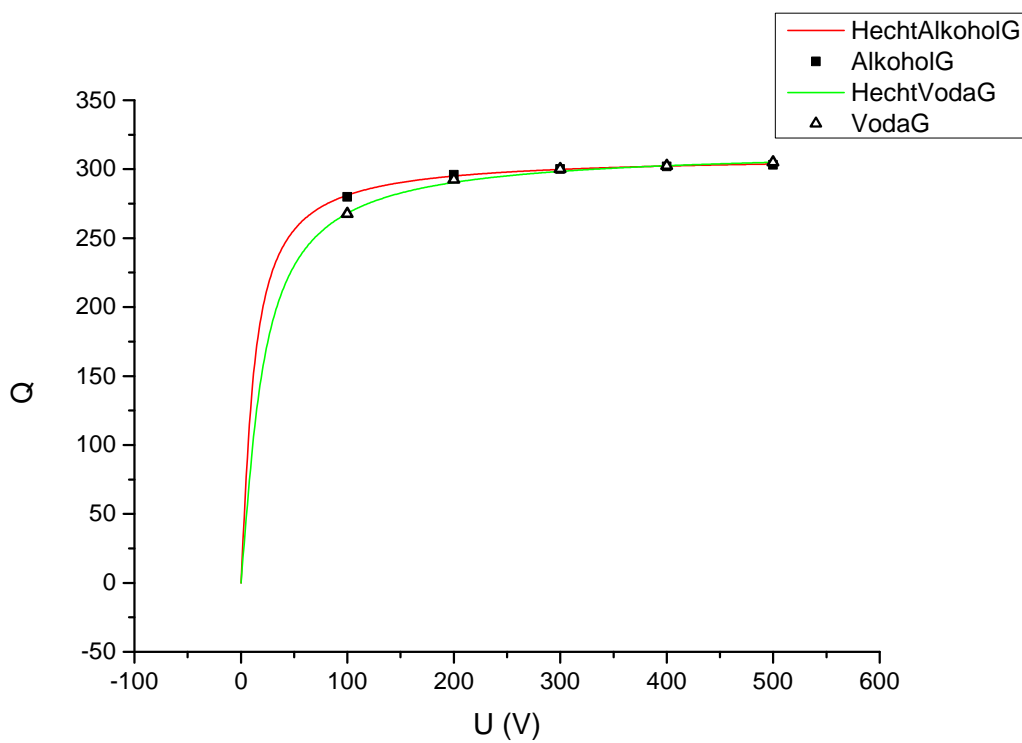
Obrázek 3.6: Spektrum gama zářiče Am^{241} pro alkoholové kontakty



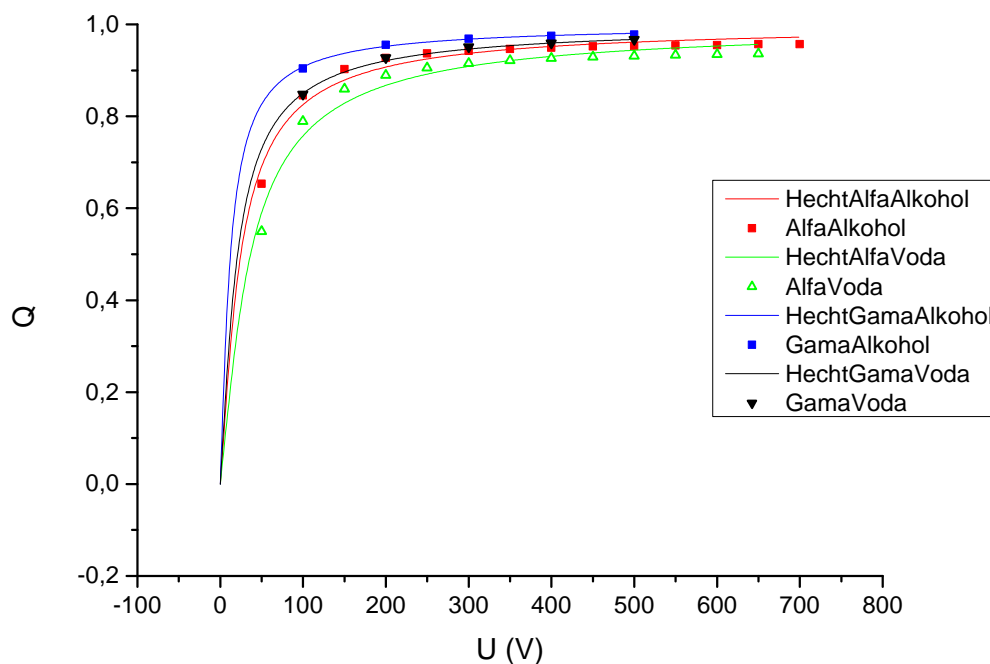
Obrázek 3.7: Spektrum gama zářiče Am^{241} pro vodní kontakty



Obrázek 3.8: Spektrum gama zářiče Am^{241} - porovnání alkoholových a vodních kontaktů při napětí 500V



Obrázek 3.9: Srovnání Hechtovy relace pro gama zářič Am^{241} pro alkoholové a vodní kontakty

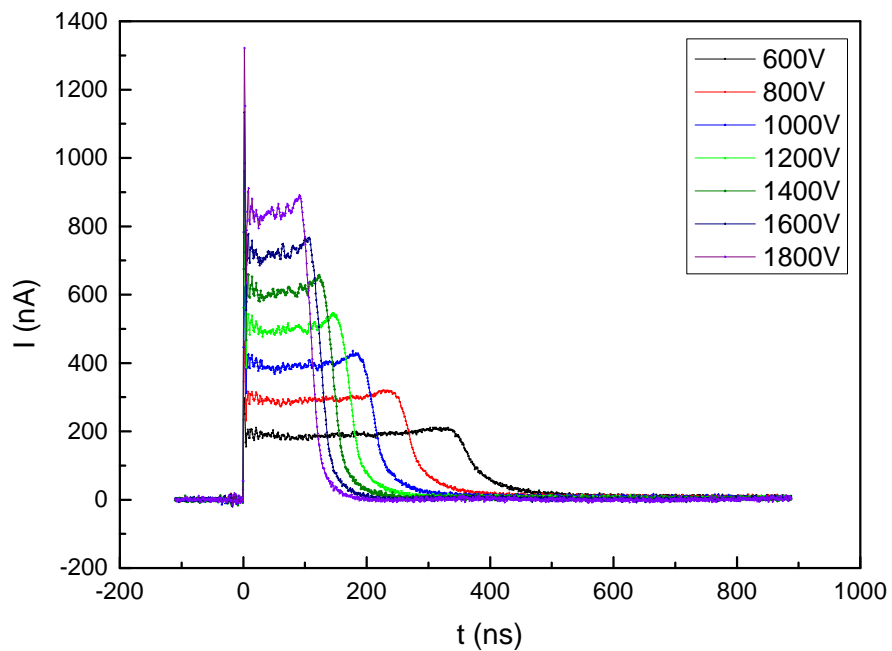


Obrázek 3.10: Srovnání Hechtovy relace pro α -zářič, γ -zářič pro alkoholové a vodní kontakty

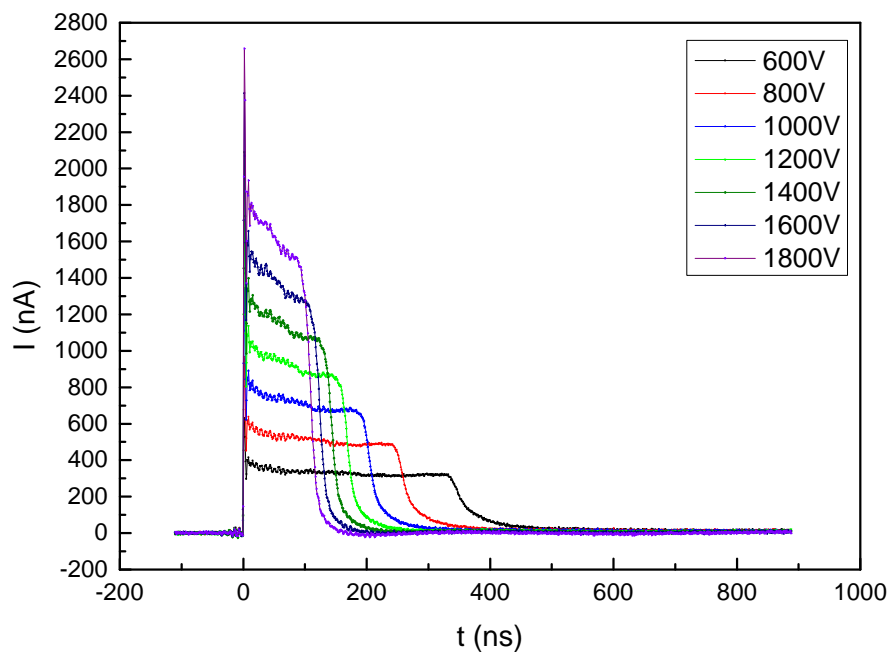
3.4 TCT

Měření TCT probíhalo postupem popsaným v části 2.1.4, přičemž použitý osciloskop pro záznam časových proudových závislostí byl LeCroy WaveRunner 640Zi, 40 Gs/s, rozlišení až 11 bitů, 4 GHz šířka pásma, 50 Ω DC vstupní odpor. Detektor byl ozařován pulzní laserovou diodou (660nm vlnová délka, 300mW maximální výkon píku, 3ns FWHM, 200ps délka náběžné hrany), přibližná velikost ozářené plochy detektoru byla 3mm². Přičemž pro oba použité typy kontaktů byl svazek zaměřen na střed plného kontaktu (struktura GR byla na druhé neozářené straně). Laserová dioda byla napájena z vysoce rychlého pulzního generátoru Picosecond Pulse Labs 10 070A s laditelnou šířkou pulzu a opakovací frekvencí. V použitém měření byla opakovací frekvence 100Hz. Výkon pulzu (v řádu nJ) byl dostatečně malý, aby nezpůsobil změnu vnitřního pole, ale silný natolik, aby bylo možné zaznamenat signál odezvy detektoru. Zdrojem napětí byl Iseg SHQ 122M s maximálním napětím 2000V (při měření bylo použito maximální napětí 1800V). Naměřené proudové časové závislosti jsou pro alkoholové kontakty na obrázku 3.11 a pro vodní kontakty na obrázku 3.12. Z nich je vidět odlišný charakter pulzů mezi náběžnou a sestupnou hranou. Zatímco pro alkoholové kontakty je tato oblast rostoucí pro všechna napětí, pro vodní kontakty je tato oblast klesající, to souvisí s jiným profilem elektrického pole uvnitř detektoru. Profil pole byl určen fitováním (v oblasti časových závislostí mezi náběžnou a sestupnou hranou) závislosti (2.8) v části 2.1.4, čímž byl získán parametr a určující sklon lineární závislosti elektrického pole uvnitř detektoru, přičemž hodnota $\mu\tau$ byla použita z

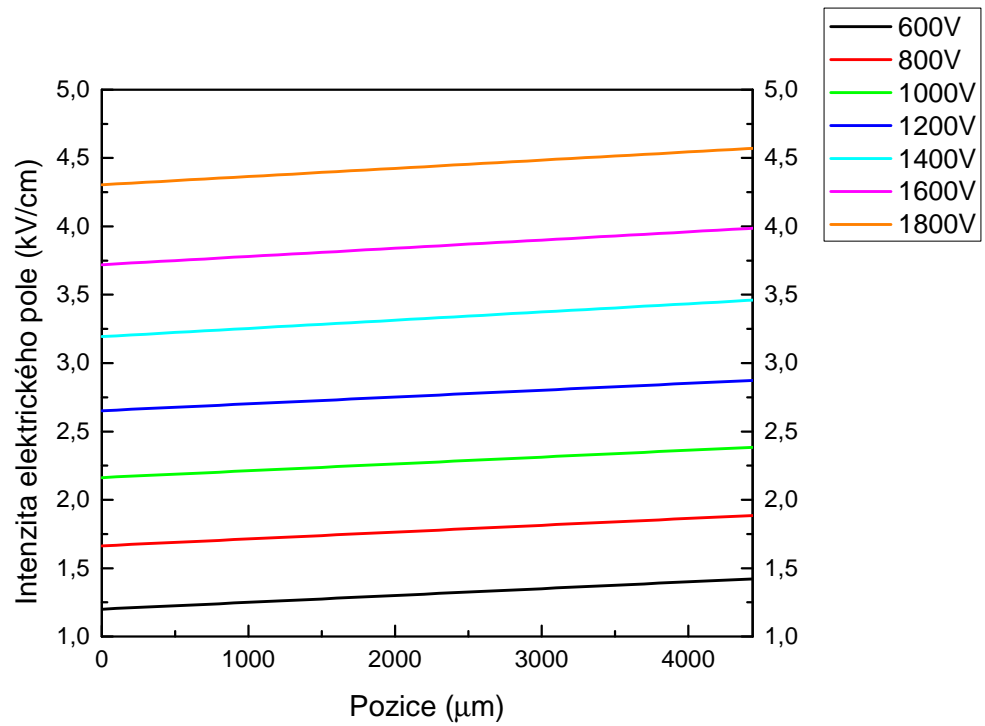
měření spekter α záření. Profily pole jsou pro alkoholové kontakty na obrázku 3.13 a pro vodní kontakty na obrázku 3.14. V těchto obrázcích je profil pole vyneseno pro pozici v detektoru, přičemž poslední hodnota pozice odpovídá tloušťce detektoru. Profil pole je pro alkoholové kontakty rostoucí, zatímco pro vodní je klesající, to svědčí o možných jiných vlastnostech těchto kontaktů.



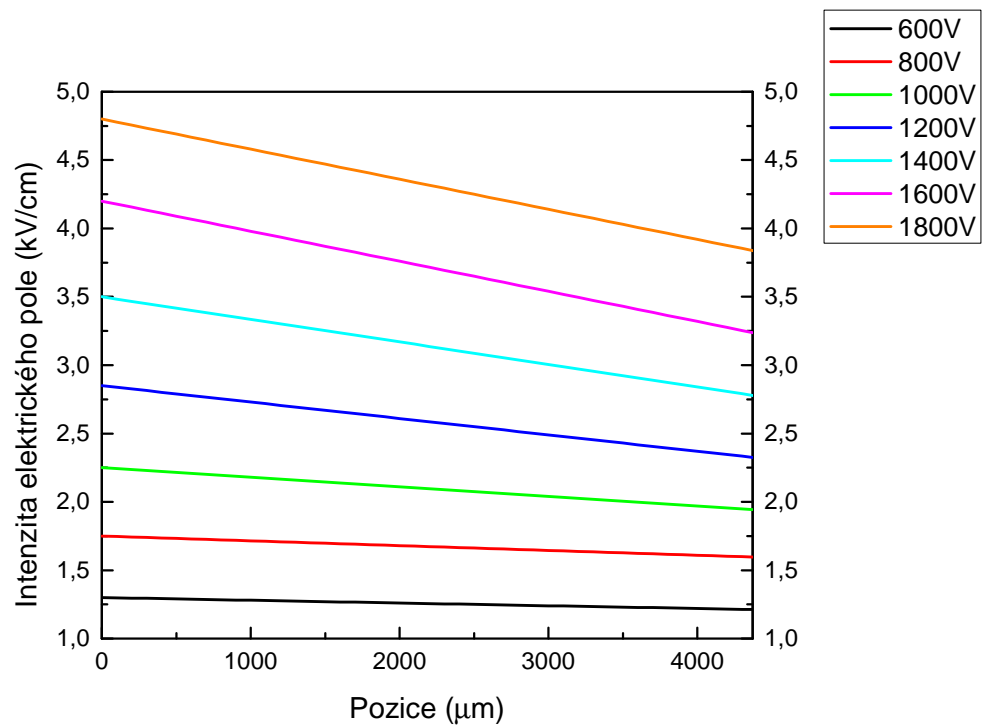
Obrázek 3.11: TCT pro alkoholové kontakty



Obrázek 3.12: TCT pro vodní kontakty



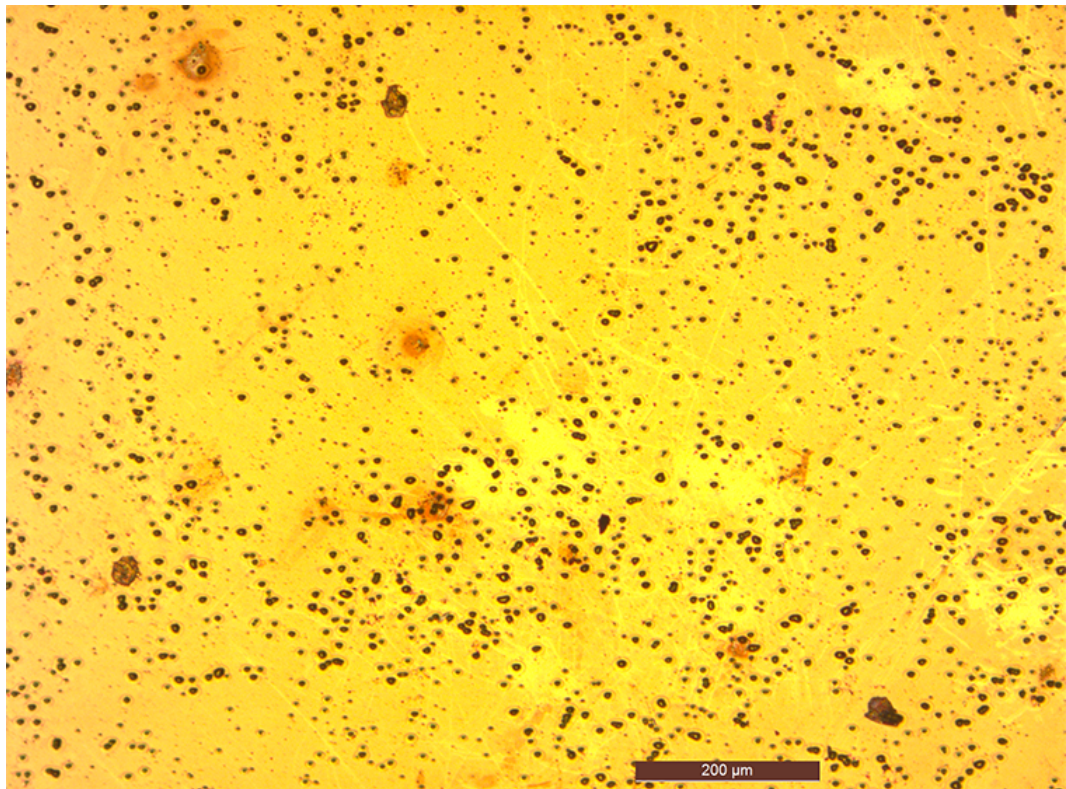
Obrázek 3.13: Profil elektrického pole pro alkoholové kontakty, tloušťka detektoru je $4445\mu\text{m}$



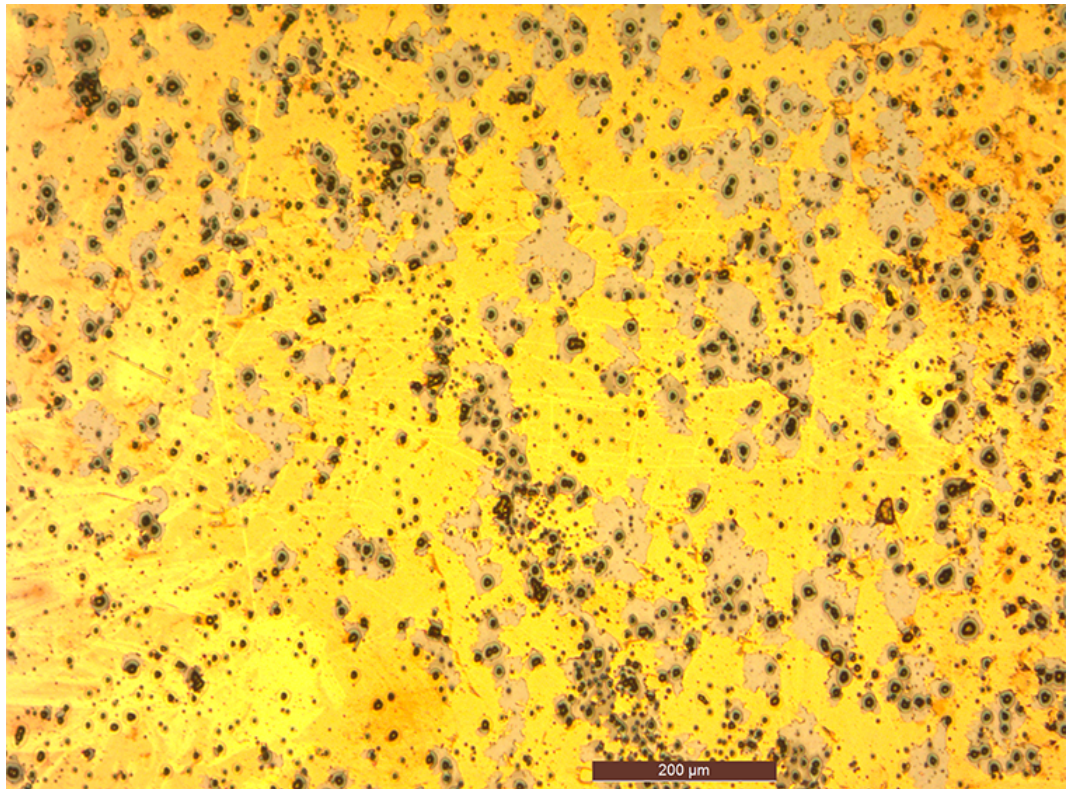
Obrázek 3.14: Profil elektrického pole pro vodní kontakty, tloušťka detektoru je $4372\mu\text{m}$

3.5 Adheze kontaktů

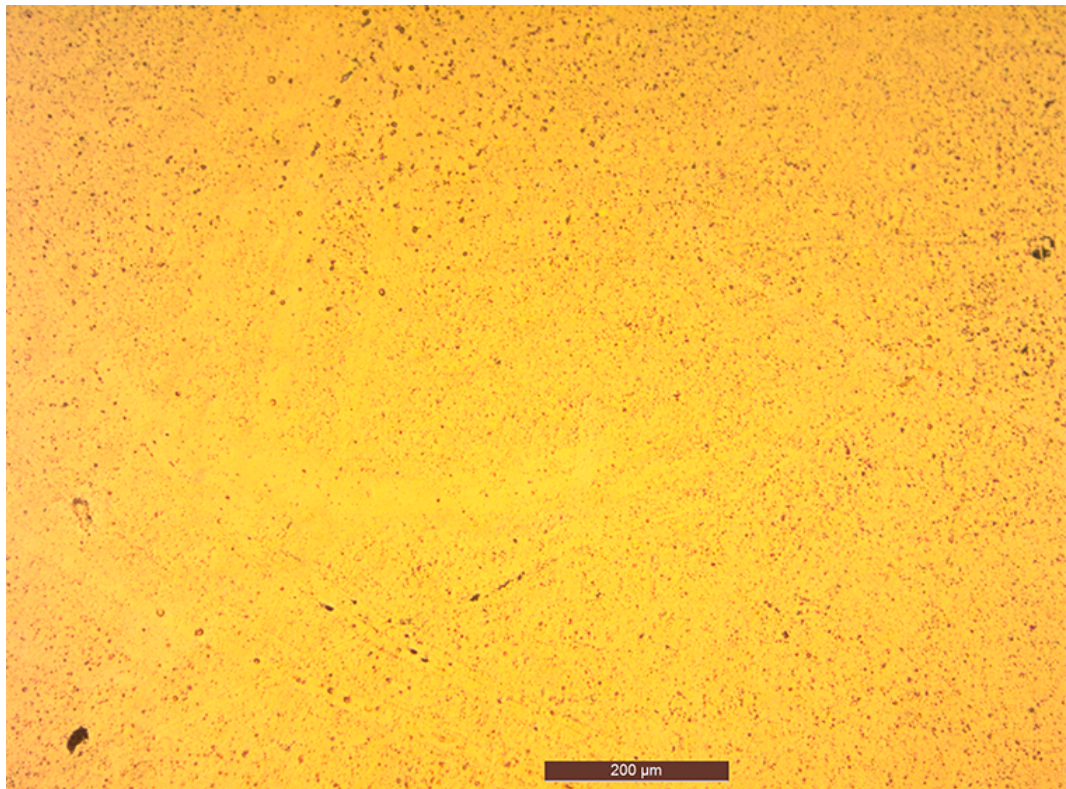
Další studovanou vlastností kontaktů byla jejich přilnavost (adheze) k povrchu polovodiče. Ta byla porovnána pro alkoholové a vodní kontakty pomocí porovnání stavu kontaktu před a po stržení lepicí páskou. Fotky z mikroskopu jsou pro alkoholové kontakty před stržením kontaktu na obrázku 3.15 a po stržení 3.16. Pro vodní kontakty jsou fotky z mikroskopu před stržením kontaktu na obrázku 3.17 a po stržení 3.18. V obrázcích je vyznačeno měřítko, jehož velikost je $200\mu\text{m}$. Sytě žluté barvě v obrázcích odpovídá zlatý kontakt a světlejším oblastem v obrázku 3.16 odpovídá odhalený povrch detektoru, tmavé oblasti v obrázku 3.18 odpovídá odhalený povrch detektoru. Srovnáním zmíněných obrázků před a po stržení kontaktů je vidět, že alkoholové kontakty mají větší adhezi k povrchu polovodiče než vodní kontakty, protože po stržení alkoholových kontaktů převážná část jejich povrchu zůstala, zatímco u vodních kontaktů se většina povrchu kontaktu strhla. Snazší stržení a větší hladkost vodního kontaktu ukazuje na jeho pravděpodobné přemostování nerovností povrchu pod kontaktem. Jiný mechanismus tvorby kontaktu spolu s jinými chemickými reakcemi při nanášení chloridu zlatitého z alkoholového resp. vodního roztoku mohou ovlivnit vznik mezivrstvy mezi kontaktem (kovem) a polovodičem a následně ovlivnit detekční schopnosti detektoru.



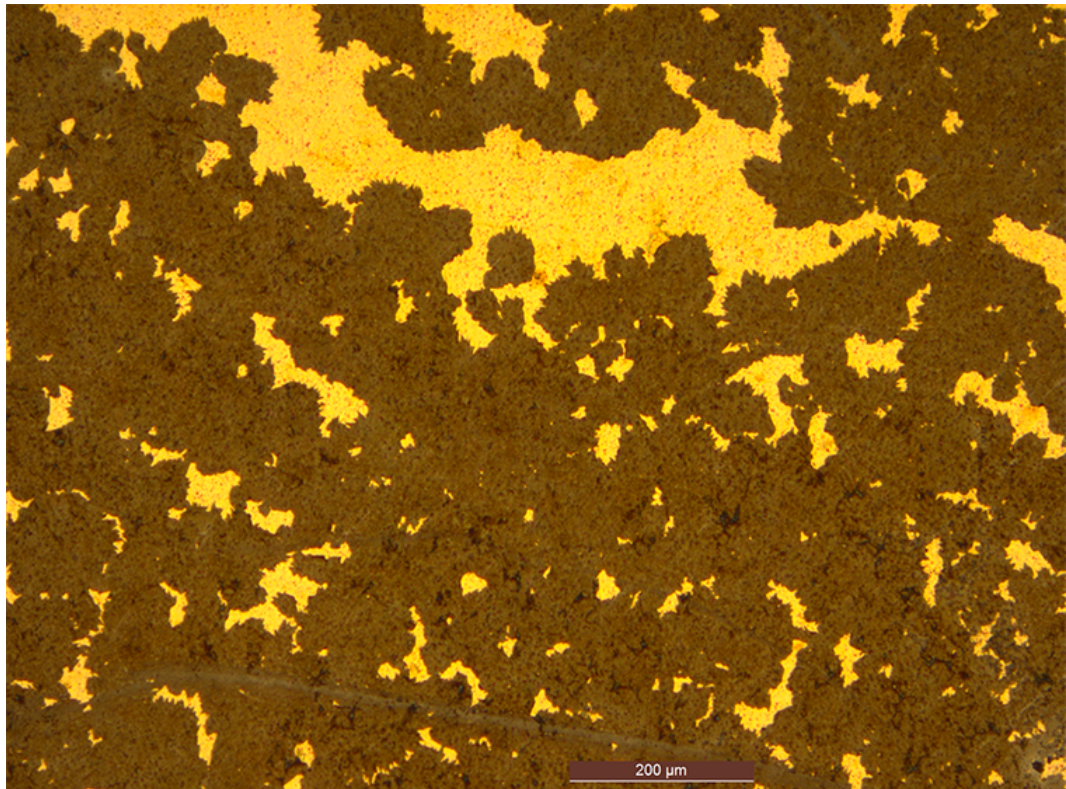
Obrázek 3.15: Alkoholový kontakt před stržením



Obrázek 3.16: Alkoholový kontakt po stržení lepicí páskou



Obrázek 3.17: Vodní kontakt před stržením



Obrázek 3.18: Vodní kontakt po stržení lepicí páskou

4. Shrnutí a závěr

Cílem této práce bylo porovnat vlastnosti alkoholových a vodních kontaktů a jejich vliv na detekční schopnosti detektorů rtg a gama záření. Studované kontakty byly nanášeny na materiál CZT. Byl vytvořen testovací detektor a byly změřeny jeho detekční vlastnosti (např. součin pohyblivosti a doby života nosičů náboje $\mu\tau$). Vlastnosti detektoru byly porovnány pro různé zdroje záření a typy kontaktů. Mimo spektroskopických měření byly změřeny také V-A charakteristiky detektoru. Na základě provedených měření lze usuzovat na jiné vlastnosti alkoholových kontaktů oproti vodním kontaktům, zejména lepší adhezi alkoholových kontaktů a také menší hodnotu svodových proudů u alkoholových kontaktů. Přestože se povrch vodních kontaktů jeví na obrázcích z mikroskopu hladší a více homogenní než povrch alkoholových kontaktů, zmíněné menší svodové proudy a lepší adheze alkoholových kontaktů ukazuje na odlišné vlastnosti alkoholových kontaktů a jejich možné aplikace na detektory záření. Rovněž hodnota $\mu\tau$ vyšla pro alkoholové kontakty pro všechna měření větší než pro vodní kontakty. To rovněž svědčí o možném použití alkoholových kontaktů. Průměrné elektrické pole uvnitř detektoru vyšlo v případě alkoholových kontaktů větší než v případě vodních kontaktů, to se v případě stejné pohyblivosti nosiče náboje pro oba typy kontaktů projeví lepším sběrem náboje pro alkoholové kontakty. Zároveň bylo zjištěno, že alkoholové kontakty vytvářejí mírně záporný prostorový náboj v polovodiči, což se projevilo mírným růstem elektrického pole od katody k anodě. Naproti tomu standardní technologie s vodními kontakty vytváří kladný prostorový náboj uvnitř polovodiče a pokles elektrického pole od katody k anodě.

V dalším výzkumu vlivu kontaktů na detekční schopnosti detektoru by bylo vhodné otestovat další detektory a porovnat alkoholové kontakty s elektrickými kontakty, které jsou připravené jinou metodou než chemicky (např. napařené kontakty). Také by bylo vhodné porovnat alkoholové kontakty připravené z roztoku chloridu zlatitého a jiného alkoholu než metanolu (etanol, propanol). Pro další zlepšení vlastností detektoru by bylo vhodné povrch detektoru pasivovat a zajistit dlouhodobou časovou stabilitu jeho vlastností.

Seznam použité literatury

- [1] BELL, D. R., BAKER, M. A., DUARTE, D., AND SCHNEIDER, A. Characterization of the metal–semiconductor interface of gold contacts on CdZnTe formed by electroless deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48:27304 (14pp), 2015.
- [2] LACHISH, U. The role of contacts in semiconductor gamma radiation detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 403:417–424, 1998.
- [3] BELL, D. R., BAKER, M. A., CHEN, H., AND MARTHANDAM, P. A multi-technique characterization of electroless gold contacts on single crystal CdZnTe radiation detectors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46:48–58, 2013.
- [4] KNOLL, G. F. *Radiation detection and measurement; 4th ed.* Wiley, New York, NY, 2010.
- [5] BELAS, E. AND MORAVEC, P. Polovodičové detektory záření, 2016.
- [6] SZE, S. M. *Physics of Semiconductor Devices.* Wiley, New York, NY, 1981.
- [7] PEKÁREK, J. Detektory RTG a gama záření na bázi polovodiče CdTe/CdZnTe. Master’s thesis, Univerzita Karlova v Praze, 2013.
- [8] VOTOČEK, L. Příprava a vlastnosti kontaktů na polovodičích typu CdTe/CdZnTe. Master’s thesis, Univerzita Karlova v Praze, 2003.
- [9] UXA, S., BELAS, E., GRILL, R., PEKÁREK, J., PRAUS, P., AND JAMES, R. B. Determination of electric-field profile in CdTe and CdZnTe detectors using transient-current technique. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 59:2402–2408, 2012.
- [10] CANALI, C., NAVA, F., AND REGGIANI, L. Drift velocity and diffusion coefficients from time-of-flight measurements. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 58:87–97, 1985.
- [11] PRAUS, P., BELAS, E., BOK, J., GRILL, R., AND PEKÁREK, J. Laser induced transient current pulse shape formation in (CdZn)Te detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 63:246–251, 2016.

Seznam obrázků

1.1	Vnitřní fotoefekt [5]	5
1.2	Vnější fotoefekt pro kov (vlevo) a polovodič (vpravo) [5]	6
1.3	Sfaleritová krystalická struktura [7]	8
1.4	Pásový diagram odděleného kovu (vlevo) a polovodiče (vpravo) pro $\Phi_M < \Phi_S$, překresleno z [6]	10
1.5	Pásový diagram MS struktury pro Ohmický kontakt, překresleno z [6]	10
1.6	Pásový diagram MS struktury pro Schottkyho kontakt, překresleno z [6]	10
2.1	Schéma zapojení detektoru s GR [7]	12
2.2	Schéma aparatury na měření radiačních spekter [7]	13
2.3	Schéma nakontaktovaného vzorku upevněného na podložce [7]	13
2.4	Schéma aparatury na měření TCT [11]	15
2.5	Modelové ukázky časových proudových závislostí, překresleno z [10]	16
2.6	Schéma profilu elektrického pole E v detektoru, na který dopadá záření, překresleno z [9]	18
3.1	Porovnání V-A charakteristik alkoholových a vodních kontaktů	22
3.2	Spektrum α -zářiče Am^{241} pro alkoholové kontakty	24
3.3	Spektrum α -zářiče Am^{241} pro vodní kontakty	24
3.4	Spektrum α -zářiče Am^{241} - porovnání alkoholových a vodních kontaktů při napětí 600V	25
3.5	Srovnání Hechtovy relace pro α -zářič Am^{241} pro alkoholové a vodní kontakty	25
3.6	Spektrum gama zářiče Am^{241} pro alkoholové kontakty	26
3.7	Spektrum gama zářiče Am^{241} pro vodní kontakty	26
3.8	Spektrum gama zářiče Am^{241} - porovnání alkoholových a vodních kontaktů při napětí 500V	27
3.9	Srovnání Hechtovy relace pro gama zářič Am^{241} pro alkoholové a vodní kontakty	27
3.10	Srovnání Hechtovy relace pro α -zářič, γ -zářič pro alkoholové a vodní kontakty	28
3.11	TCT pro alkoholové kontakty	30
3.12	TCT pro vodní kontakty	30
3.13	Profil elektrického pole pro alkoholové kontakty, tloušťka detektoru je $4445\mu\text{m}$	31
3.14	Profil elektrického pole pro vodní kontakty, tloušťka detektoru je $4372\mu\text{m}$	31
3.15	Alkoholový kontakt před stržením	33
3.16	Alkoholový kontakt po stržení lepící páskou	33
3.17	Vodní kontakt před stržením	34
3.18	Vodní kontakt po stržení lepící páskou	34

Seznam tabulek

1.1	Přehled parametrů pro vybrané polovodiče [5]	8
3.1	Hodnoty $\mu\tau$ pro alkoholové a vodní kontakty	23

Seznam použitých zkratek

CZT	telurid kadmato-zinečnatý
(e-h) pár	elektron-děrový pár
CCE	charge collection efficiency - účinnost sběru náboje
GR	struktura guard ring - ochranná elektroda
e, q	náboj elektronu
E_0	klidová energie elektronu ve vakuu
E_A	energie akceptorové hladiny
E_D	energie donorové hladiny
E_C	vodivostní pás
E_V	valenční pás
E_F	energie elektronu na Fermiho hladině
E_g	šířka zakázaného pásu energií
eV	elektronvolt
χ	afinita polovodiče
W	výstupní práce
Q	elektrický náboj
t	čas
I	elektrický proud
U	elektrické napětí přiložené na detektor
MS struktura	kontakt kov-polovodič
OPN	oblast prostorového náboje
V-A charakteristika	volt-ampérová charakteristika
MCA	Multichannel Analyzer - multikanálový analyzátor
TCT	Transient-Current Technique - měření tranzientních proudů
$\mu\tau$	součin pohyblivosti a doby života nosiče elektrického náboje