

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá vlastnostmi CdTe detektorů. Tento materiál patří do skupiny opticky citlivých materiálů. Práci lze tématicky rozdělit na dvě základní části. První část popisuje vlastnosti obou prvků a také celé sloučeniny. Z vybraných vlastností lze vyčíst přednosti tohoto materiálu, které jej předurčují do optické oblasti použití. Závěr této části tvoří popis kontaktu kov-polovodič. Tato problematika je důležitá pro pochopení podstaty okontaktování popisovaného materiálu.

V druhé části práce byla provedena řada měření. Pro přesnější porovnání byla měření nejprve provedena bez osvětlení a teprve poté s osvětlením. Během měření byla měněna vlnová délka záření a teplota vzorku. Klíčovými závislostmi byly Volt-Ampérová charakteristika a sledování odporu s různou teplotou vzorku a různou vlnovou délkou záření dopadajícího na vzorek. Pro vyšší přesnost byla měření několikrát opakována. Všechna data z měření byla zpracována na PC programem Easyplot.

Klíčová slova: Kadmium, Tellur, CdTe detektor, kontakt kov-polovodič, pásový model kovu a polovodiče, pásový model kontaktu kov-polovodič, F33B8, 452B, F35C3.

Abstract

This Diploma thesis deals with properties of CdTe detectors. This material is ranked among optical sensitive group. This thesis can be thematically divided into two basic parts. The first part describes properties of both elements and the chemical adduct. Selected properties show perfections of the material, which are specializing it to optical area of application. The end of this part contains description of contact metal-semiconductor. This problem is important to comprehension principle the material contact.

In second part there were making many measurements. For more accurately compare were first measurements doing without light and then with light. During making measurement was changed wave length and temperature of sample. Key factors were Volt-Ampere characteristics and resistance result with changed temperature and wave length impact to the sample. For better accuracy measurements were done many times. All of data from measurement were cultivate by PC Easyplot programme.

Keywords: Cadmium, Tellur, CdTe detector, contact metal-semiconductor, band model of metal and semiconductor, band model of contact metal-semiconductor, F33B8, 452B, F35C3.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma analýza signálů z transportních a stochastických charakteristik detektorů záření jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Alexeji Andreevovi, za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....

Obsah

Obsah	7
Seznam zkratk	12
Úvod	13
1 Chemické prvky	15
1.1 Tellur	15
1.2 Kadmium	16
2 Vlastnosti polovodičů	18
2.1 Krystalová struktura CdTe	18
1.1 Defekty	19
1.2 Mechanické vlastnosti	20
1.3 Elektrické (transportní) vlastnosti	20
1.4 Optické vlastnosti	21
2 Kontakty	21
2.1 Základní pojmy	21
2.2 Základní typy kontaktů	22
2.2.1 Původ energetických bariér na rozhraní	23
2.3 Základní veličiny k popisu kontaktů patří:	23
2.4 Modelování kontaktů	24
2.5 Druhy kontaktu dle výpočtů	26
3 Měřicí pracoviště a měřené vzorky	27
4 Měření Volt-Ampérových charakteristik	28
4.1 První měření	29
4.1.1 Vzorek F33B8	29
4.1.2 Vzorky 452B a F35C3	31
4.2 Druhé měření	34
4.2.1 Vzorek F33B8	34
4.2.2 Vzorek F35C3	36
4.2.3 Vzorek 452B	38
5 Měření odporu vzorku F33B8	39
5.1 První měření	39
5.2 Druhé měření	41
6 Příměsové hladiny	44
7 Vlastnosti polovodiče při osvětlení	46
8 Měření vzorku při osvětlení	47

8.1	Zapojení vzorku v přímém a zpětném směru.....	48
8.2	Zapojení vzorku 452B v přímém směru	49
8.2.1	Hledání vlnové délky	49
8.2.2	Citlivá oblast vlnových délek pro přímý směr	50
8.3	Zapojení vzorku 452B ve zpětném směru	51
8.3.1	Hledání vlnové délky	51
8.3.2	Citlivá oblast vlnových délek pro zpětný směr.....	52
8.4	Měření dlouhodobých měření	54
8.5	Zapojení vzorku F35C3 v přímém směru	54
8.5.1	Hledání vlnové délky	54
8.5.2	Citlivá oblast vlnových délek pro přímý směr	55
8.6	Zapojení vzorku F33B8 v přímém směru	56
8.6.1	Hledání vlnové délky	56
Závěr		58
Použitá literatura		60

Seznam obrázků

Obr.1.1 Tellur.....	15
Obr.1.2 Kadmium	17
Obr.2.1 Krystalová struktura CdTe.....	18
Obr.2.1 Energetický pásový model kovu a polovodiče typu- <i>p</i> před vytvořením kontaktu	25
Obr.2.2 Energetický pásový model kovu a polovodiče typu- <i>p</i> při propojení	25
Obr.2.3 Energetický pásový model kontaktu kovu a polovodiče typu- <i>p</i> v propustném směru	25
Obr.2.4 Energetický pásový model kontaktu kovu a polovodiče typu- <i>p</i> v závěrném směru .	25
Obr.3.1 Pracoviště.....	27
Obr.3.2 Měřené vzorky (F33B8 vlevo, 452B vpravo).....	28
Obr.4.1 Schéma zapojení pro měření vzorek CdTe	29
Obr.4.2 Označení kontaktů vzorku	30
Obr.4.3 Volt-Ampérové charakteristiky na proudových kontaktech pro vzorek F33B8.....	30
Obr.4.4 Volt-Ampérové charakteristiky na napět'ových kontaktech pro vzorek F33B8.....	31
Obr.4.6 Volt-Ampérové charakteristiky na proudových kontaktech pro vzorek F35C3.....	32
Obr.4.7 Závislost proudu na teplotě pro konstantní napájecí napětí $U = \text{konst} = 6\text{V}$ pro vzorky 452B (vlevo) a F35C3 (vpravo).....	33
Obr.4.8 Grafické znázornění úbytku napětí na vzorku	34
Obr.4.9 Volt-Ampérové charakteristiky na proudových kontaktech pro vzorek F33B8.....	35
Obr.4.11 Volt-Ampérová charakteristika na proudových kontaktech pro vzorek F35C3	36
Obr.4.12 Volt-Ampérová charakteristika na napět'ových kontaktech pro vzorek F35C3	37
Obr.4.13 Rozptyl křivek při teplotě 303K	38
Obr.5.1 Měření odporu na napět'ových kontaktech v lineárním zobrazení pro vzorek F33B8.....	40
Obr.5.2 proložení části charakteristiky zobrazené obrázkem Obr.5.1	40
Obr.5.3 Měření odporu na napět'ových kontaktech v log. zobrazení pro vzorek F33B8	41
Obr.5.4 Měření odporu na proudových kontaktech pro vzorek F33B8.....	42
Obr.5.5 Měření odporu mezi proudovým a napět'ovým kontaktem 1-2 pro vzorek F33B8...	42
Obr.5.6 Měření odporu mezi proudovým a napět'ovým kontaktem 3-4 pro vzorek F33B8...	43
Obr.5.7 Měření odporu na napět'ových kontaktech v lineárním zobrazení pro vzorek F33B8.....	43
Obr.5.8 Proložení charakteristiky zobrazené obrázkem Obr.5.7	44
Obr.6.1 Příměsové hladiny	44

Obr.6.2 Různé obsazení příměsových hladin	45
Obr.8.1 Schéma zapojení pro měření vzorek CdTe s monochromátorem	47
Obr.8.2 Zapojení vzorku v přímém směru	48
Obr.8.3 Zapojení vzorku ve zpětném směru	48
Obr.8.4 Zapojení vzorku v přímém směru s osvětlením	48
Obr.8.5 Zapojení vzorku ve zpětném směru s osvětlením	48
Obr.8.6 Hledání citlivé vlnové délky v přímém směru pro vzorek 452B, časová závislost ...	49
Obr.8.7 Hledání citlivé vlnové délky v přímém směru pro vzorek 452B, rozložení vlnových délek	49
Obr.8.8 Detail na citlivou oblast vlnových délek v přímém směru pro vzorek 452B, časová závislost	50
Obr.8.9 Detail na citlivou oblast vlnových délek v přímém směru pro vzorek 452B, rozložení vlnových délek	50
Obr.8.10 Hledání citlivé vlnové délky ve zpětném směru pro vzorek 452B, časová závislost	51
Obr.8.11 Hledání citlivé vlnové délky ve zpětném směru pro vzorek 452B, rozložení vlnových délek	51
Obr.8.12 Detail na citlivou oblast vlnových délek ve zpětném směru pro vzorek 452B	52
Obr.8.13 Detail na citlivou oblast vlnových délek ve zpětném směru, rozložení vlnových délek pro vzorek 452B	52
Obr.8.14 Detail na citlivou oblast vlnových délek ve zpětném směru pro vzorek 452B	53
Obr.8.15 Reakce na nastavenou vlnovou délku ve zpětném směru	54

Seznam tabulek

Tab.1.1 Chemické vlastnosti Telluru	15
Tab.2.1 Přehled základních vlastností používaných polovodičových materiálů při teplotě 300K.....	18
Tab.2.2 Vybrané teplotní a mechanické vlastnosti při teplotě 300K.....	20
Tab.3.1 Použité přístroje	27
Tab.4.1 Parametry vzorku F33B8	28
Tab.4.2 Porovnání velikosti odporu na napěťových kontaktech	37
Tab.8.1 Detail na citlivou oblast vlnových délek ve zpětném směru pro vzorek 452B	53

Seznam zkratek

a	mřížková konstanta [$\text{\AA}$]
CdTe	Tellur Kadmia
E_g	energie zakázaného pásu [eV]
E	energie [eV]
E'	$E/(k_B T)$
E_A	energie příslušející akceptorové hladině [eV]
E_C	energie na dně vodivostního pásu [eV]
E_D	energie příslušející donorové hladině [eV]
E_e	intenzita elektrického pole [V/m]
E_i	intenzita intrinsické Fermiho hladiny [eV]
E_F	energie Fermiho hladiny [eV]
E'_F	$E_F/(k_B T)$
E_g	energie zakázaného pásu [eV]
ΔE	výška energetické bariéry [eV]
E_{VAK}	energie vakua [eV]
e	elementární náboj $= 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
e^-	elektron
h	Planckova konstanta $= 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
k_B	Boltzmanova konstanta $= 1.380 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
m	hmotnost [kg]
m_0	hmotnost volného $e^- = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
m_e	efektivní hmotnost elektronu [m_0]
N_A	koncentrace akceptorových center [cm^{-3}]
N_D	koncentrace donorových center [cm^{-3}]
T	teplota [K]
V_a	elektrické napětí přiložené na kontakt [V]
ϵ_0	absolutní dielektrická konstanta
$\epsilon_{(0)}$	statická dielektrická konstanta [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]
λ	vlnová délka [m]
μ_D	driftová pohyblivost nosičů [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]
μ_H	Hallovská pohyblivost nosičů [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]
μ_e	pohyblivost elektronů [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]
μ_h	pohyblivost děr [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]
ρ	měrný odpor materiálu [$\Omega\cdot\text{cm}$]
ρ_m	hustota materiálu [g/cm^3]
ρ_e	nábojová hustota elektronů [C/cm^3]
ρ_h	nábojová hustota děr [C/cm^3]
Φ_K	výstupní práce kovu [eV]
Φ_p	výstupní práce polovodiče [eV]
χ	elektronová afinita polovodiče [eV]

Úvod

Mezi nejpoužívanější prvky pro výrobu polovodičových součástek patří zejména Si, Ge nebo GaAs. Jejich rozšířenost je způsobena především snadnou dostupností objemných, vysoce kvalitních monokrystalů. V dnešní době začínají pronikat do oblasti polovodičových materiálů také prvky II a VI skupiny periodické tabulky. Z uvedených skupin uveďme Zn, Cd, Hg jako zástupce IIB skupiny a Te, Se za skupinu VIA. Tyto prvky vytlačují své předchůdce pro své vynikající elektrické a optické vlastnosti. Používání těchto materiálů je však brzděno přípravou objemných monokrystalů s dostatečnou kvalitou a požadovanými vlastnostmi. Ty ovlivňuje metoda růstu a technologické úpravy jako je žíhání.

Díky svým vlastnostem se mezi nejsledovanější polovodič zařadila sloučenina CdTe (telurid kadmennatý). Klíčovými vlastnostmi jsou měrný odpor/vodivost, koncentrace volných nosičů náboje, jejich pohyblivost a střední doba života. Měrný odpor lze nastavit v rozmezí 10^1 až $10^{10} \Omega\text{cm}$. Koncentrace volných nosičů se pohybuje v rozsahu 10^7 - 10^{16}cm^{-3} , jejich pohyblivost dosahuje hodnot $1000 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ pro elektrony a $100 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ pro díry. Prvky zastupují IIB i VIA skupinu. Materiál vykazuje velký absorpční koeficient pro vysokoenergetické fotony a přímý zakázaný pás, který zajišťuje účinnější rekombinaci. Tyto parametry směřují materiál k výrobě solárních článků s vysokou účinností, optických detektorů, dozimetru ionizujícího záření, spektroskopů, optoelektronických součástek a laserů. Atomová čísla zastoupených prvků předurčují materiál k užití v oblasti záření x a γ . Další unikátní polovodičové vlastnosti CdTe se projevují v tekutém stavu.

Má-li být maximálně využito výborných vlastností těchto materiálu, je nezbytně nutné zvládnout techniku okontaktování vyrobených součástek. Kvalita kontaktu vyrobené součástky určí další využití v praxi. Nejčastěji používané kontakty jsou ploché vyrobeny z prvků Au, Ni nebo Pt. Spolehlivé okontaktování představuje složitý technologický proces. Nicméně díky rychlému vývoji techniky se je možné kvalitně materiál okontaktovat.

Největší problém představuje rozhraní struktury kov-polovodič a příprava materiálu detektoru k nanesení kontaktu, dále způsob nanesení a použitý kov pro samotný kontakt. Kontakty mohou být ohmické nebo usměrňující. Výroba ohmického kontaktu představuje vyšší nároky na technologii, neboť rozhraní kov-polovodič není homogenní systém, tudíž na něj nelze uplatnit Ohmův zákon. Je možná výroba kontaktů typu- n i typu- p . Ani zde však nejsou nároky na výrobu stejné. Kontakt typu- n je možno dosáhnout běžně při dodržení pracovního postupu. Výroba kontaktu typu- p však není dosud dořešena.

Snahou současnosti je výroba takového kontaktu, který bude elektricky, mechanicky a tepelně stabilní. Na širokém rozsahu provozní teploty a proudového zatížení bude vykazovat Ohmické chování, kde odpor kontaktu nebude závislý na přiloženém napětí.

V této práci budou zkoumány zejména elektrické vlastnosti. Jelikož je polovodič předurčen k implementaci do optických zařízení, bude součástí práce provedena řada měření. Nejprve budou vzorky měřeny bez působení záření. Budou sledovány jejich reakce na změny teplot. Mezi hlavní měřené závislosti budou patřit Volt-Ampérové charakteristiky. Ty budou měřeny za různých teplot několikrát za sebou. Provedou se také časově rozsáhlá měření, na kterých bude zjišťována jejich stabilita.

Ve druhé polovině této práce budou zkoumány elektrické vlastnosti vzorků při působení světelného záření. Bude hledána vlnová délka, na kterou jsou jednotlivé vzorky citlivé. Dále bude blíže tato oblast proměřena. Přiložené napětí bude zapojeno v obou směrech a reakce porovnávány. Prokládáním změřených charakteristik se pokusím nalézt časové konstanty a množství příměsových hladin ve vzorcích.

Jelikož některé vzorky již byly před časem měřeny, lze naměřené výsledky porovnávat také mezi těmito měřeními. Jednotlivá měření budou pro větší přesnost opakována.

1 Chemické prvky

1.1 Tellur

Tellur, chemická značka Te, lat. Tellurium je polokovový stříbřitě lesklý prvek za skupiny chalkogenů používaný v polovodičové technice a metalurgii.

Základní fyzikálně - chemické vlastnosti

Tellur je dosti vzácný prvek, byl objeven roku 1782 Franzem Josephem Mullerem. Chemicky patří spíše mezi kovy, ale jsou známy i kyseliny telluru a jejich soli, v nichž chemicky připomíná spíše síru nebo selen.

Výskyt, výroba

Tellur obvykle doprovází síru a selen v jejich rudách. Má značnou afinitu ke zlatu a v mnoha zlatých ložiscích se vyskytuje jako příměs. Z minerálů jsou známy například tellurid zlata calaverit AuTe_2 nebo tellurid olova alait PbTe .

Průmyslově se tellur získává nejčastěji z anodových kalů po elektrolytické výrobě mědi nebo ze zbytků po rafinaci zlata.

Relativní zastoupení telluru v zemské kůře je velmi nízké. Odhaduje se, že jeho obsah kolísá v rozmezí 0,001–0,005 ppm (mg/kg). V mořské vodě je jeho koncentrace tak nízká, že současné analytické techniky nebyly schopny jeho množství spolehlivě změřit.

Atomové číslo	52
Relativní atomová hmotnost	127,60(3) amu
Elektronová konfigurace	$[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2 5p^4$
Elektronegativita (Pauling)	2,1
Teplota tání	449,51 °C (722,66 K)
Teplota varu	988 °C (1261 K)
Hustota	6,24 g.cm ⁻³
Hustota při teplotě tání	5,70 g.cm ⁻³
Registrační číslo CAS	13494-80 ⁻⁹
Tvrdost	2,25
	

Obr.1.1 Tellur

Tab.1.1 Chemické vlastnosti Telluru

Sloučeniny a využití

Elementární tellur je za normálních podmínek stálý stříbrně lesklý a poměrně křehký kov. Dostí snadno se slučuje s kyslíkem a halogeny. Ve sloučeninách se tellur vyskytuje v mocenství Te^{2-} , Te^{2+} , Te^{4+} a Te^{6+} .

V metalurgii složí tellur ve formě mikrolegur ke zlepšování mechanických a chemických vlastností slitin. Nízké koncentrace telluru zvyšují tvrdost a pevnost slitin olova i jejich odolnost vůči působení kyseliny sírové. Přídavky telluru do slitin mědi a nerezových ocelí způsobují jejich snazší mechanickou opracovatelnost.

Telurid gallia nalézá využití v polovodičovém průmyslu. Pro výrobu některých termoelektrických zařízení se používá tellurid bismutu. Ve sklářském průmyslu je v některých speciálních případech tellurem barveno sklo.

Jako velmi perspektivní se jeví použití sloučenin telluru při výrobě fotočlánků. Fotočlánky na bázi teluridu kadmia patří v současné době k nejvýkonnějším a probíhá intenzivní výzkum s cílem vyrobit prakticky využitelné solární panely.

Na bázi teluridů jsou i záznamové vrstvy v přepisovatelných optických discích. Z hlediska působení na lidské zdraví patří sloučeniny telluru mezi toxické a především v průmyslových provozech, kde se vyskytují ve zvýšených koncentracích je třeba zachovávat přísné bezpečnostní předpisy. Za zvláště nebezpečné je pokládáno vdechování aerosolů a prachu s vysokou koncentrací telluru [15].

1.2 Kadmium

Kadmium, chemická značka Cd, lat. Cadmium je měkký, lehce tavitelný, toxický kovový prvek. Slouží jako součást různých slitin a k povrchové ochraně jiných kovů před korozí. Vzhledem k jeho toxicitě je jeho praktické využití omezováno na nejnutnější minimum.

Základní fyzikálně - chemické vlastnosti

Typický kovový prvek bílé barvy. Byl objeven roku 1817 německým chemikem Friedrichem Stohmeyerem. Patří mezi přechodné prvky, které mají valenční elektrony v d-sféře. Ve sloučeninách se vyskytuje téměř pouze v mocenství Cd^{2+} , sloučeniny Cd^{1+} jsou silně nestálé.

V silných minerálních kyselinách je kadmium dobře rozpustné za vývoje plynného vodíku. Na vzduchu je kovové kadmium stálé, ale v atmosféře kyslíku je možné jej zapálit za vzniku oxidu kademnatého CdO .

Výskyt a výroba

V zemské kůře je kadmium vzácným prvkem. Průměrný obsah činí kolem 0,1 – 0,5 mg/kg. I v mořské vodě je jeho koncentrace značně nízká - 0,11 mikrogramu v jednom litru. Předpokládá se, že ve vesmíru připadá na jeden atom kadmia přibližně 36 miliard atomů vodíku.

V přírodě se kadmium vyskytuje jako příměs rud zinku a někdy i olova, z nichž se také společně získává. K oddělení kovů se vzhledem k poměrně nízkému bodu varu používá destilace.

Atomové číslo	48
Relativní atomová hmotnost	112,411(8) amu
Elektronová konfigurace	[Kr] 4d ¹⁰ 5s ²
Elektronegativita (Pauling)	1,69
Teplota tání	321,07 °C (594,22 K)
Teplota varu	767 °C (1040 K)
Hustota	8,65 g.cm ⁻³
Hustota při teplotě tání	7,996 g.cm ⁻³
Registrační číslo CAS	7440-43-9
	

Obr.1.2 Kadmium

Tab.1.2 Chemické vlastnosti Kadmia

Využití, sloučeniny

Díky prokázané toxicitě kadmia převládá v současné době tendence k jeho nahrazování jinými kovy všude tam, kde je to technicky a ekonomicky možné.

Pokrytí povrchu jiného kovu kadmiem bylo dříve velmi často používáno jako antikoroze ochrana především pro železo a jeho slitiny. Galvanické kadmiování různých pracovních nástrojů a železných součástí sloužilo jako vysoce účinná ochrana před atmosférickou korozi.

Velmi významné využití nachází kadmium doposud při výrobě pájek. Jedná se přitom o slitiny kadmia se stříbrem, cínem a zinkem, které mají velmi dobré mechanické vlastnosti – pevnost a houževnatost sváru, ale i velmi dobře vedou elektrický proud. Díky tomu jsou i přes nepříznivé zdravotní účinky kadmia stále hojně využívány v elektronickém průmyslu. Je však zřejmé, že legislativa Evropské unie velmi brzy zakáže kompletně používání pájek s obsahem kadmia v elektrotechnické výrobě.

Poměrně významné místo patří kadmiu ve výrobě galvanických elektrických článků typu Cd-Ni. Nikl-kadmiové akumulátory vykazují velmi dobré elektrické vlastnosti (kapacita x hmotnost) a lze je i zpětně dobíjet proudem opačné polarity. Na rozdíl od klasických olověných akumulátorů se v nich jako elektrolyt používá roztok alkalického hydroxidu.

Ze sloučenin kadmia má největší praktický význam sulfid (sirič) kademnatý CdS, intenzivně žlutá sloučenina slouží při výrobě malířských pigmentů jako kadmiová žlut'. Uplatnění se i jako luminofor při výrobě černobílých televizích obrazovek [15].

2 Vlastnosti polovodičů

Skupina	Polovodič	ρ_m [g/cm ³]	a [Å]	Krystal.st.	E _g [eV]	Zakáz.p.	μ [cm ² Vs]		$\epsilon_{(0)}$	m_e [m ₀]	M_h [m ₀]
							μ_n	μ_p			
II-VI	CdS	4,82	5,83	W	2,42	D	340	50	5,4	-	-
	CdTe	5,87	6,482	ZB	1,14	D	1050	60	7,2	0,09	$m_{lh}=0,12$ $m_{hh}=0,84$
	ZnTe	6,34	6,101	ZB	2,26	D	340	100	10,4	0,13	0,6
	ZnO	5,6752	4,58	W	3,35	D	200	180	9	-	-
	ZnS	4,084	5,42	ZB	3,54	D	180	5	8,9	-	-

W – wurtzit

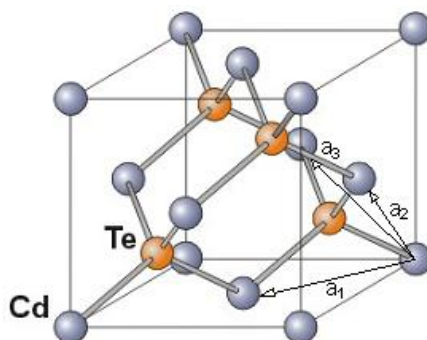
ZB – zinc blende (sfalerit)

Tab.2.1 Přehled základních vlastností používaných polovodičových materiálů při teplotě 300K

Z tabulky lze vyčíst základní parametry materiálů skupiny II-IV. Sloučenina CdTe je v těchto vlastnostech velmi podobná ostatním materiálům. Z vybraných veličin dominuje na první pohled svou až 3x vyšší pohyblivostí nosičů náboje u materiálu typu-*n* [1].

2.1 Krystalová struktura CdTe

CdTe krystalizují při atmosférickém tlaku ve sfaleritové krystalové struktuře. Ta vznikne spojením dvou plošně centrovaných kubických mříží, které jsou vůči sobě posunuty ve směru prostorové úhlopříčky o jednu čtvrtinu. Jedna podnížka obsahuje pouze atomy kadmia (Cd) a druhá pouze atomy teluru (Te). Každý atom Te má jako nejbližší 4 sousední atomy Cd umístěné v rozích pravidelného čtyřstěnu a stejně tak každý atom Cd má 4 sousední atomy Te.



Obr.2.1 Krystalová struktura CdTe

Struktura patří do kubické grupy bez středu inverze. Čtyřstěn obsahuje 2 atomy. Zpravidla se uvažuje konvenční cela ve tvaru kvádrů, ta obsahuje 8 atomů. Chemická vazba mezi atomy je kovalentní a je tvořena Cd $5s^2$ a Te $5s^2 5p^4$ elektrony – hybridní s- p^3 vazba.

Změnou tlaku dochází ke změně krystalové struktury a charakteru vazby mezi atomy. CdTe má při atmosférickém tlaku převahu kovalentní vazby. Při tlaku okolo 3MPa dochází k fázovému přechodu ze sfaleritové struktury na strukturu soli kamenné, začíná převládat iontová vazba, objem materiálů se sníží přibližně o 20% a elektrický odpor klesne až o 6 řádů. Pro tlaky dosahujících 10MPa začíná převládat mezi atomy vazba kovová a elektrická vodivost materiálu dosahuje hodnot většiny kovů [8].

1.1 Defekty

Nejčastější poruchy CdTe krystalické mřížky

1. Vakance – chybějící atom v mřížkové poloze
2. Intersticiální atom – atom nacházející se v mezimřížkové pozici
3. Substituční atom – nahrazení atomu mřížky atomem příměsi
4. Antisite – mřížková poloha je obsazena atomem jiné složky vlastního krystalu
5. Frenkelův párový defekt vakance – chybějící atom v mřížce nadbývá v jiné části mřížky
6. A-centrum – komplex vakance s jiným donorem

Koncentrace defektů je jak teplotně, tak tlakově závislá a je bohužel oproti polovodičům z III-V skupiny poměrně vysoká. Je to způsobeno zvýšenou vyšším podílem iontové vazby. K odstraňování těchto poruch se využívá difúze při různých teplotách. Vodivost typu-p je způsobena příměsemi, nikoliv defekty. Typ a pozice cizího atomu určuje jeho chování v krystalu, stane-li se donorem nebo akceptorem. Akceptorová centra vznikají náhradou Cd prvky IA (Li, Na, K) a IB skupiny (Ag, Au, Cu) a náhradou Te prvky VA skupiny (As, N, P, Sb). Experimentálně určena vazební energie v případě mělkých akceptorů se pohybuje v rozmezí 56-263meV. Jako nejmělkčí akceptory se chovají nahrazující prvky Li, N a Na. Asi nejhlubším akceptorem je Au.

Jako donory se chovají prvky IIIA (Al, Ga, In) a VII A skupiny (Br, Cl, F, I). Bude-li se během rostoucí krystal dotovat Cl, kompenzační jev povede ke vzniku semiizolačních krystalů. Donorový charakter mají rovněž atomy vzácných kovů v intersticiálních polohách. Typické hodnoty vazebních energií mělkých donorů z IIIA a VIIA skupiny leží v rozmezí 13,7 – 14,8meV.

K dotaci CdTe, pro zkvalitnění krystalu, lze použít také přechodové kovy (Fe, Ni, V), zvláště vanad pomáhá ke zvýšení kvality [5].

1.2 Mechanické vlastnosti

Materiál	Specifické teplo [J/kgK]	Debyeova teplota [K]	Koef.lineární tepelné expanze α [10^{-6}K^{-1}]	Tepelná vodivost [mW/cmK]
Au	129	-	14,2	3170
Ag	235	-	18,9	4290
CdTe	205	200	4,9	58,5
Ga	371	-	-	406
In	233	-	32,1	816
Si	702	645	2,49	1240
Pt	133	-	8,8	716

Tab.2.2 Vybrané teplotní a mechanické vlastnosti při teplotě 300K

Mezi základní parametry materiálu řadíme jeho tvrdost (odolnost vůči mechanickému namáhání), plasticitu a v případě CdTe ještě fotoplasticitu (závislá na osvětlení materiálu). Tvrdost čistého CdTe dosahuje hodnoty asi 50kg/mm^2 . Tato hodnota se zdatelně zvyšuje zvětšováním obsahu zinku v materiálu.

Plasticita materiálu se mění v závislosti na koncentraci nosičů proudu a na osvětlení (fotoplasticita). Je experimentálně potvrzeno, že vysokoodporový materiál vykazuje nejmenší napětí na mezi kluzu, s malou závislostí na osvětlení. U nízkoodporových vzorků docházelo při aplikaci záření odpovídající šířce zakázaného pásu ke zvýšení napětí na mezi kluzu až na 70%. Někdy byl v závislosti na historii namáhání vzorku pozorován tzv.negativní fotoplastický jev – pokles napětí na mezi kluzu při osvětlení [7].

1.3 Elektrické (transportní) vlastnosti

Mezi základní transportní vlastnosti řadíme typ vodivosti a její velikost, koncentraci nosičů proudu, jejich pohyblivost, tepelnou vodivost a mechanismy rozptylu elektronů, poskytující informace o elektron-fononové interakci a o odchylkách skutečné krystalové mříže od ideální periodické struktury.

Transport náboje v CdTe je zásadně ovlivněn interakcí elektronů a děr s optickými a částečně akustickými fonony. Velkou roli hrají také příměsi. Obecně lze říci, že pohyblivost nosičů náboje prudce klesá s teplotou.

Závislost pohyblivosti m na teplotě T v intervalu 50 – 300K je určena téměř výhradně rozptylem elektronů na ionizovaných příměsích a optických fononech. Při vysokých teplotách (nad 775K) je závislost pohyblivosti modifikována převažujícím rozptylem na podélných optických fononech, dále je ovlivňována silnou teplotní závislostí statické dielektrické konstanty ϵ_0 a multipásovou vodivostí $G_{le} - L_{le}$.

Pohyblivost nosičů náboje při teplotě vyšší než pokojové (300K) lze získat vztahem:

$$m=57[\exp(252/T)-1] [\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}]. \quad (1.1)$$

1.4 Optické vlastnosti

Z pásové teorie vyplývá, že polovodič s přímým zakázaným pásem lze v principu využít jako luminiscenční zdroj záření. Složitá pásová (energetická) struktura CdTe kromě mezipásmových přechodů umožňuje mnoho dalších způsobů interakce elektromagnetického záření s materiálem. Z optických měření (propustnosti, odrazivosti, fotoemise, intrapásové absorpce na volných nosičích a přechodů závislých na tlaku, lze získat cenné informace o pásové struktuře, vibračních modelech krystalové mříže (fonony). Z jiných optických měření (luminiscence, absorpce, Faradayova jevu a piezodvojlonu) lze navíc získat informace o krystalových defektech, excitonech, polaritonech apod.

Absorpce na volných nosičích pokrývá oblast vlnových délek 1 – 2 μm . Dá se pokládat za přímo úměrnou koncentraci volných elektronů pro střední a vysoké rovnovážné koncentrace elektronů.

Další experimentální metoda užívaná pro identifikaci vlastních defektů a příměsí je založena na měření tzv. luminiscenčního spektra. Tyto měření se často provádějí za velmi nízkých teplot s využitím Fourierovské spektroskopie [11].

2 Kontakty

2.1 Základní pojmy

Chování elektronů v krystalu popisuje Fermi-Diracova statistika. Pravděpodobnost obsazení energetické hladiny E je vyjádřena Fermi-Diracovou rozdělovací funkcí:

$$f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + \exp(E' - E'_F)}, \quad (2.1)$$

$$E' = \frac{E}{k_B T}, \quad (2.2)$$

$$E'_F = \frac{E_F}{k_B T}. \quad (2.3)$$

E - energie elektronu [eV]

E_F - energie Fermiho hladiny (definována jako energetická hladina, jejíž pravděpodobnost obsazení elektrickým nábojem je $\frac{1}{2}$) [eV]

k_B - Boltzmanova konstanta

T - Teplota [K]

Poloha Fermiho hladiny je závislá na dotaci polovodiče příměsemi a na teplotě krystal. Pro vlastní (intrinsické) polovodič je přibližně rovna $E_g/2$ (E_g je energie zakázaného pásu), naopak pro polovodiče příměsové (extrinsické) závisí poloha Fermiho hladiny na koncentraci příměsí.

Ze znalosti stavů v energetickém pásmu a Fermiho-Diracovy rozdělovací funkce lze vypočítat koncentraci nosičů proudu [2], [4].

Dle příměsi lze rozdělit případy:

1. Vlastní polovodič (čistý krystal bez příměsí)
2. Příměsový polovodič
 - Slabě dotovaný polovodič ($-3k_B T < E_F < -k_B T$, $E_c = 0$ (energie elektronu na dně vodivostního pásu v polovodiči [eV]))
 - Silně dotovaný polovodič ($-3k_B T < E_F < -k_B T$, $E_c = 0$)
 - Velmi silně dotovaný polovodič ($2k_B T < E_F$)

2.2 Základní typy kontaktů

Obecně dělíme kontakty na polovodičích do dvou skupin:

- usměrňující
- ohmické

Ohmické kontakty neomezují na rozdíl od usměrňujících proud v závislosti na jeho směru. Naproti tomu usměrňující kontakty obsahují potenciálové bariéry (na rozhraní kov-polovodič) generující oblasti prostorového náboje v polovodiči a tak omezují injekci volných nosičů v jednom směru a brání toku proudu ve směru druhém. Existuje množství nejrozumnějších vlivů, které zásadně ovlivňují ohmičnost kontaktu.

Mezi ně řadíme:

Prostorový náboj – přítomnost elektrické dvojvrstvy na rozhraní

Existence povrchových stavů

Přítomnost třetí fáze – mezivrstva oxidů

Nerovnovážné děje způsobené přítomností vnějších polí (dopadajícího záření, změnou tlaku apod.) – elektrická, tepelná či mechanická nerovnováha

Chemickou strukturou povrchu obou materiálů v kontaktu [4], [12].

K teoretickému popisu mechanismu transportu náboje přes potenciálovou bariéru na rozhraní se užívá několik modelů:

1. Emisní modely – elektrony musí překonávat výšku bariéry, mají-li se podílet na transportu náboje. Tepelné emise:
 - Diodová teorie – střední volná dráha nosičů je dlouhá ve srovnání se šířkou bariéry
 - Difuzní teorie – střední volná dráha nosičů je krátká ve srovnání se šířkou bariéry
2. Hybridní modely – komplexní modely zahrnující různé typy transportu náboje energetickou bariérou (tunelování tepelně excitovaných nosičů, klasická tepelná emise apod.)
3. Kvantově-mechanické modely – tunelování nosičů skrze bariéru
4. Metoda toku – na základě obecných předpokladů aplikovaných na odraz a průchod nosičů náboje nějakou vrstvou (bariérou) se sestaví soustava rovnic, která se poté řeší. Jedná se o velmi přesný model. Velmi často se používá k popisu k elektronového transportu v nízkodimenzionálních strukturách.

2.2.1 Původ energetických bariér na rozhraní

Na rozhraní kovu a polovodiče vzniká energetická bariéra, která určuje elektrické a tepelné vlastnosti struktury přechodu. Ke vzniku této bariéry může vést více podnětů:

1. Bariéra vzniká díky rozdílům ve výstupních pracích kovu a polovodiče
2. Bariéra vzniká díky přítomnosti povrchových stavů polovodiče
3. Bariéra vzniká díky přítomnosti 3. Fáze (mezivrstva)

Obecně je každý kontakt mezi kovem a polovodičem heterogenní (kontakt mezi materiály s různou šířkou zakázaného pásu). Na rozdíl od $p-n$ přechodů je proud mezi kovem a polovodičem tvořen převážně většinovými nosiči. Menšinové nosiče ovlivňují chování kontaktu až při vysokých aplikovaných napětích [14], [5].

2.3 Základní veličiny k popisu kontaktů patří:

1. F_k – **výstupní práce kovu**. Je definována jako energie potřebná k přenesení elektronu z Fermiho hladiny $E_F(\text{kovu})$ do vakua.

$$F_k = E_{\text{VAK}} - E_F(\text{kovu}). \quad (2.4)$$

2. F_p – **výstupní práce polovodiče**. Definice odpovídá F_k .

$$F_p = E_{\text{VAK}} - E_F(\text{polovodiče}). \quad (2.5)$$

Při vytváření kontaktu mezi kovem a polovodičem v nějakém místě povrchu vzorku, dochází v systému k přenosu náboje mezi kovem a polovodičem. Elektrony z polovodiče přecházejí do kovu. Tento proces pokračuje tak dlouho, dokud se nevyrovnají Fermiho hladiny obou materiálů. Výsledkem je nadbytek elektronů v povrchové vrstvě kovu a oblast kladného prostorového náboje v polovodiči. V důsledku toho vznikne napříč strukturou kov-polovodič vakuová mezera.

Začnou-li se oba povrchy přibližovat, roste při konstantním napětí kapacita systému. Rovněž dojde k nárůstu záporného náboje v povrchové vrstvě kovu. Díky vysoké vodivosti kovu je tato vrstva, a tedy hloubka vniku do elektrického pole kovu, velmi malá. Způsobuje nepatrné zakřivení pásu v kovu, což vede v tomto případě ke snížení bariéry. Podobně v polovodiči dochází k rozšíření oblasti kladného prostorového náboje z důvodu zachování elektrické neutrality celého systému [13].

3. c – **elektronová afinita polovodiče**. Je definována jako rozdíl energií mezi dnem vodivostního pásu a hladinou vakua.

$$c = E_{\text{VAK}} - E_C. \quad (2.6)$$

Pro volbu nulové energetické hladiny $E_C = 0$, lze pro výpočet $\Phi_{\text{Polovodič}}$ použít vztah

$$F_p = c - E_F(\text{polovodiče}). \quad (2.7)$$

4. ΔE_{kp} – energetická bariéra z kovu do polovodiče. Definujeme ji jako energetický rozdíl mezi E_F (kovu) na rozhraní a nejvyšší hodnotou E_C (pro typ- n) resp. nejnižší hodnotou E_V (pro typ- p) v polovodiči.

5. ΔE_{pk} – energetická bariéra z polovodiče do kovu. Definujeme ji jako energetický rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou E_C (pro typ- n) resp. nejnižší a nejvyšší hodnotou E_V (pro typ- p) v polovodiči.

2.4 Modelování kontaktů

Vytváří-li kov úzký kontakt s polovodičem, je nezbytné vyrovnaní Fermiho hladiny obou materiálů do tepelné rovnováhy. Pro polovodič typu- n a typu- p je postup odlišný. Věnujme se případu pro materiál typu- p , jako je náš CdTe vzorek.

Výstupní práci lze vyjádřit vztahem

$$\Phi_{polovodič} = (\chi + E_g) - \mu'_F. \quad (2.8)$$

Kde μ'_F je vzdálenost mezi Fermiho hladinou E_F a stropem valenčního pásu E_V . Výstupní práce zlata (Au) je $\phi_{Au} = 5.37 \text{ eV}$. K nalezení výstupní práce polovodiče je nezbytné výpočet Fermiho hladiny. Pro tento případ (materiál p -typu) lze použít rovnici:

$$m'_F = \frac{E_A}{2} - \frac{k_B T}{2} \ln \left(\frac{N_A}{N_V} \right) \quad (2.9)$$

E_A – pozice hladiny akceptorů

N_A – koncentrace příměsi

T – teplota

N_V – efektivní hustota obsazení valenčního pásu dána vztahem:

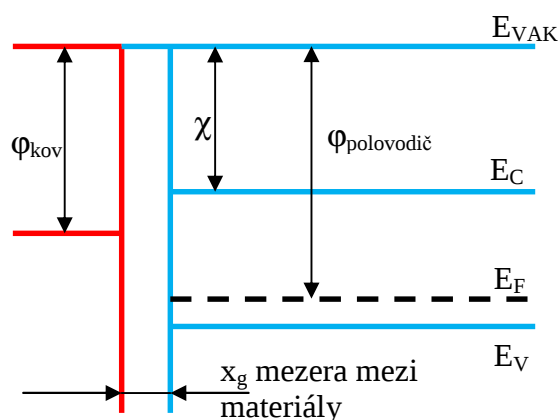
$$N_V = 2 \left(\frac{2p m_{dh} k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (2.10)$$

kde m_{dh} – hustota obsazení efektivní hmoty ve valenčním pásu. Lze vypočítat:

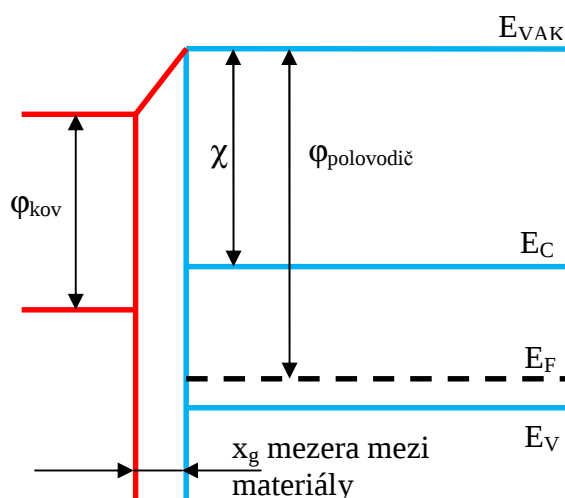
$$m_{dh} = (m_{lh}^{*3/2} + m_{dh}^{*3/2})^{2/3}, \quad (2.11)$$

kde dolní indexy označují “light” a “heavy”

Pro polovodič p -typu je hustota obsazení efektivní hmoty $m_{dh} = 7.9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. Efektivní hustota obsazení ve valenčním pásu $N_V = 2.03 \cdot 10^{25}$. Po dosazení do rovnice 2.10, dostaneme pozici Fermiho hladiny rovnu 0.25 eV měřenu od stropu valenčního pásu nebo $E_F = 5.75 \text{ eV}$ měřenu od spodní hladiny vakua. Z toho lze usoudit, že výstupní práce polovodiče je větší než u kovu [3], [4].

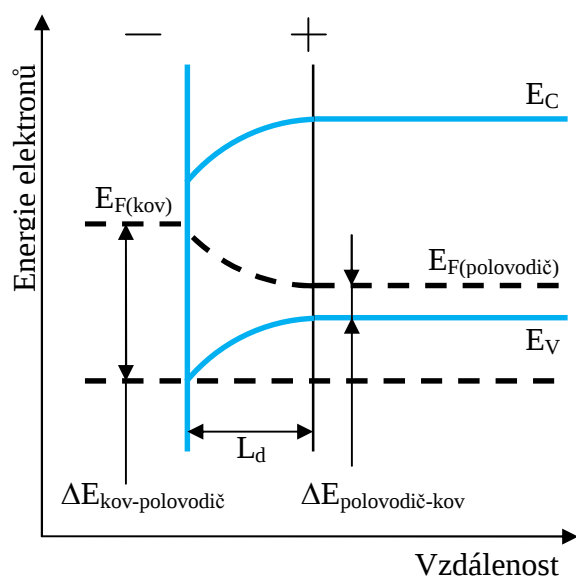


Obr.2.1 Energetický pásový model kovu a polovodiče typu-p před vytvořením kontaktu

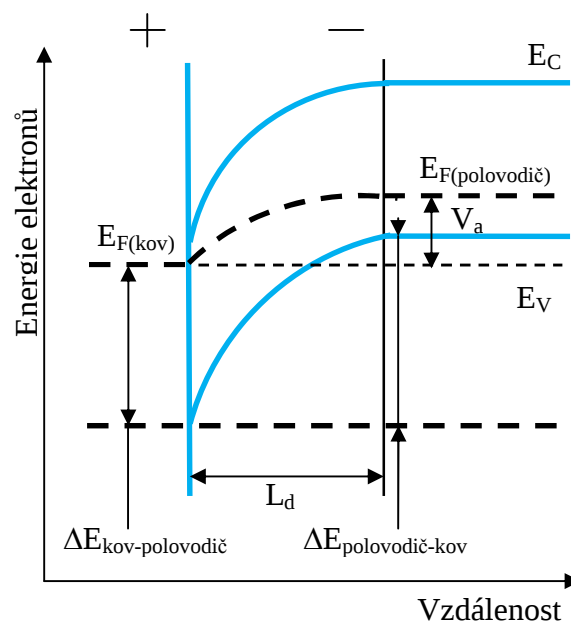


Obr.2.2 Energetický pásový model kovu a polovodiče typu-p při propojení

Rozdíl potenciálů $\phi_{kov} - \phi_{polovodič}$ se nazývá kontaktní potenciál. Se snižováním vzdáleností mezi kovem a polovodivem se na povrchu kovu zvyšuje záporný náboj. Provede-li se spojení mezi kovem a polovodivem, pak elektrony z povrchu kovu poputují k polovodiči, protože výstupní práce kovu je menší, než výstupní práce polovodiče. Tento proces potrvá tak dlouho, dokud Fermiho hladiny v kovu a polovodiči nebudou srovnány (viz.Obr.2.2). V polovodiči budou elektrony přesunuté z povrchu kovu rekombinovat s dírami. Kvůli relativně nízké koncentraci nosičů je nekompenzovaný záporný náboj elektronů přenášen přes bariérovou oblast. Výsledné elektrické pole E je umístěno zejména uvnitř mezery mezi kovem (Au) a vzorkem CdTe.



Obr.2.3 Energetický pásový model kontaktu kovu a polovodiče typu-p v propustném směru



Obr.2.4 Energetický pásový model kontaktu kovu a polovodiče typu-p v závěrném směru

Pokud oblast mezi kovem a polovodičem je dostatečně úzká, stane se elektronům otevřená. Elektrony nebudou rekombinovat s dírami na povrchu polovodiče, ale až za vyprázdňenou vrstvou L_d v takovém množství, které jim poskytne kapacita děr. Těch je v poměru k elektronům významně méně. Všechny energetické hladiny polovodiče se začnou uvnitř vyprázdňené vrstvy ohýbat.

Připojíme-li na polovodič typu- p kladný externí napětí o velikosti V_a , jedná se o přímé (propustné) pólování přechodu. Je-li kladný potenciál V_a aplikován na kov, jedná se o závěrné pólování. Na obrázku (Obr.2.3) lze vidět, že po přiložení napětí V_a v propustném směru se sníží šířka energetické bariéry. Její rovnovážný stav je pro polovodič typu- p dán vztahem:

$$\Delta E_{\text{polovodič-kov}} = (F_{\text{polovodič}} - F_{\text{kov}}). \quad (2.12)$$

Po přiložení napětí V_a do propustného směru se šířka energetické bariéry sníží o hodnotu eV_a . Dostaneme výpočetní vztah:

$$\Delta E_{\text{polovodič-kov}} = (F_{\text{polovodič}} - F_{\text{kov}} - eV_a). \quad (2.13)$$

Naopak po přiložení externího zdroje napětí o velikosti V_a do závěrného směru, energetická bariéra vzroste o hodnotu eV_a . Tento případ je naznačen v obrázku Obr.2.4. Odpovídající vztah pro výpočet definuje následující rovnice:

$$\Delta E_{\text{polovodič-kov}} = (F_{\text{polovodič}} - F_{\text{kov}} + eV_a). \quad (2.14)$$

2.5 Druhy kontaktu dle výpočtů

Na základě výpočtů energetických bariér lze překládat, bude-li výsledný kontakt ohmický nebo usměrňující [9].

Pro polovodič typu $-p$, kde platí $\phi_{\text{kov}} > \phi_{\text{polovodič}}$, budeme předpokládat ohmický kontakt za daných podmínek:

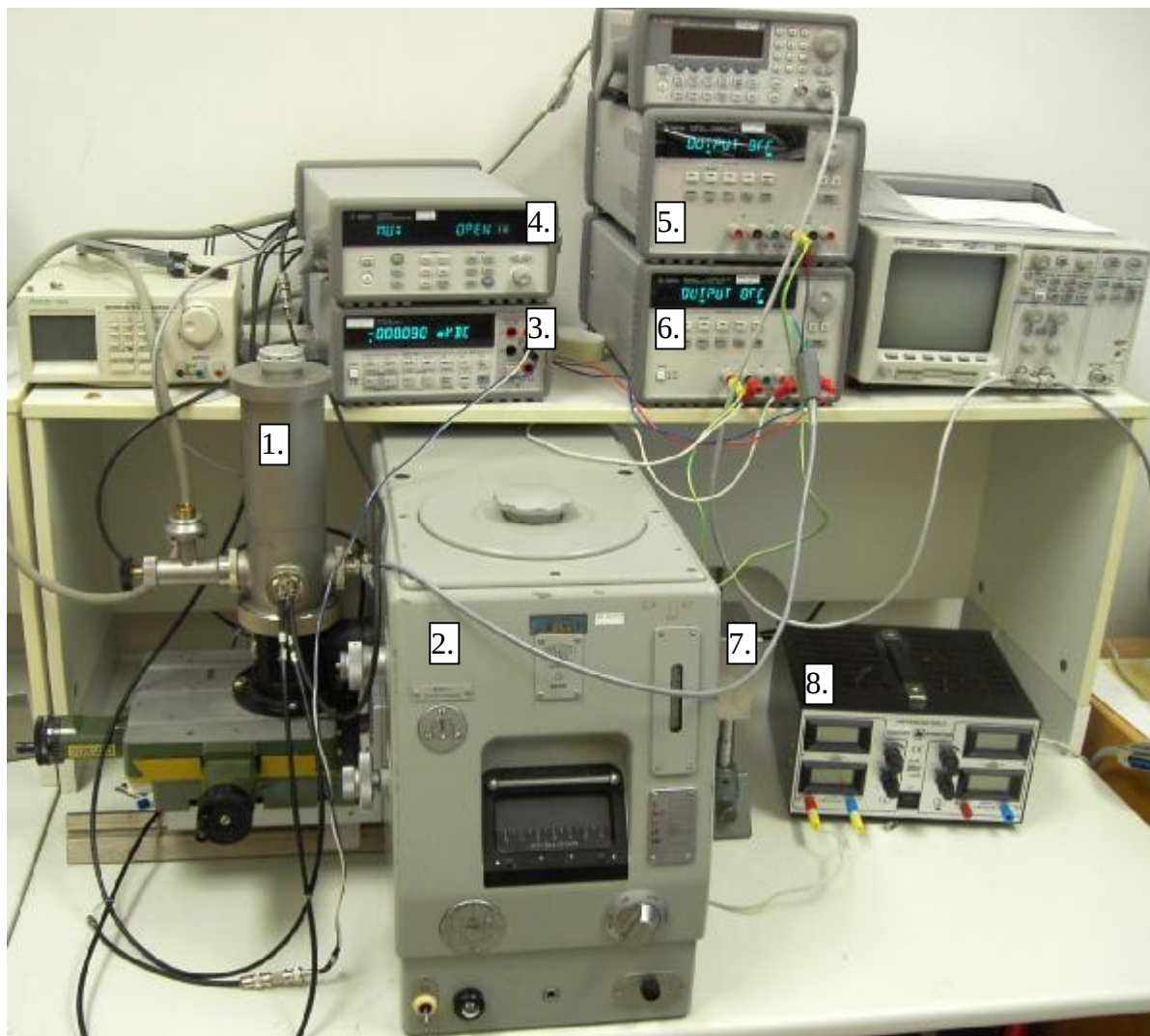
1. Bariéra pro e^- mezi kovem a polovodičem $\Delta E_{\text{kov-polovodič}} = F_{\text{polovodič}} - (c + E_g) < 0$.
2. Bariéra pro h^+ mezi polovodičem a kovem $\Delta E_{\text{polovodič-kov}} = F_{\text{polovodič}} - F_{\text{kov}} < 0$.
3. S rostoucí vodivostí polovodiče se $\Delta E_{\text{kov-polovodič}}$ zvyšuje.
4. S rostoucí vodivostí polovodiče se $\Delta E_{\text{polovodič-kov}}$ zvyšuje (pro h^+).

Pro polovodič typu $-p$, kde platí $\phi_{\text{kov}} < \phi_{\text{polovodič}}$, budeme předpokládat usměrňující kontakt za daných podmínek:

1. Bariéra pro e^- mezi kovem a polovodičem $\Delta E_{\text{kov-polovodič}} = (c + E_g) - F_{\text{polovodič}} > 0$.
2. Bariéra pro h^+ mezi polovodičem a kovem $\Delta E_{\text{polovodič-kov}} = F_{\text{polovodič}} - F_{\text{kov}} > 0$.
3. S rostoucí vodivostí polovodiče se $\Delta E_{\text{kov-polovodič}}$ nemění.
4. S rostoucí vodivostí polovodiče se $\Delta E_{\text{polovodič-kov}}$ zvyšuje (pro h^+).

3 Měřicí pracoviště a měřené vzorky

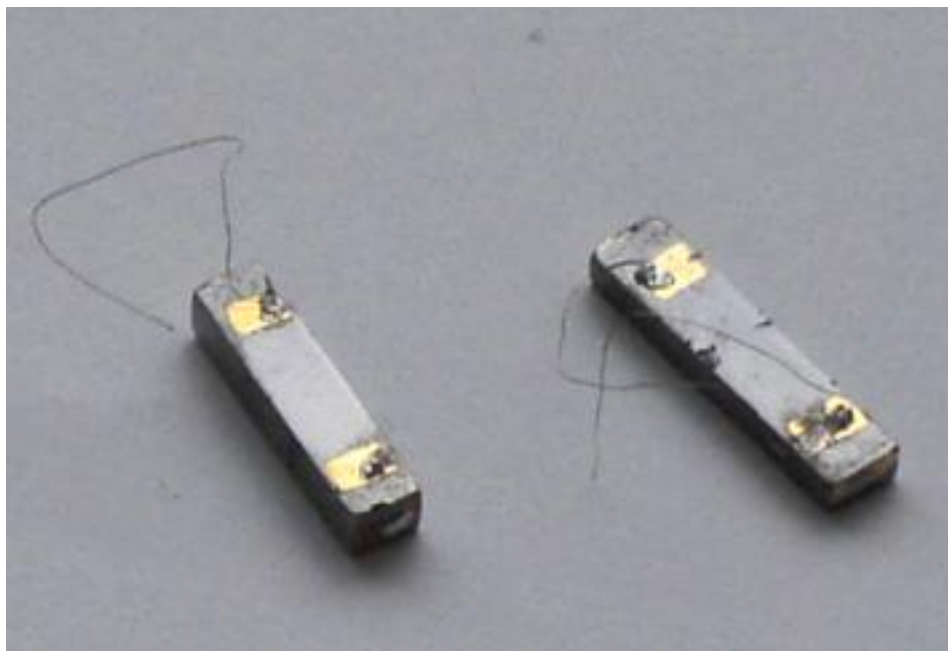
V dalších kapitolách této práce jsou již zpracovávány konkrétní naměřené údaje. Ty byly získány v laboratoři na ústavu fyziky Vysokého učení technického v Brně. V této mimořádné kapitole jsou fotografie pracoviště a měřených vzorků.



Obr.3.1 Pracoviště

Číslo přístroje z obrázku Obr.3.1	Název přístroje	Označení přístroje
1.	Kryostat	Proxxon
2.	Monochromátor	CARLZEISS 408021
3.	Digital Multimetr	Agilent 34401A
4.	Data Acquisition	MUX Agilent 34970A
5.	DC Power Suply 1	Agilent E3631A
6.	DC Power Suply 2	Agilent E3631A
7.	Osvětlovací žárovka	12V
8.	Laboratorní zdroj	Statron 2229

Tab.3.1 Použité přístroje



Obr.3.2 Měřené vzorky (F33B8 vlevo, 452B vpravo)

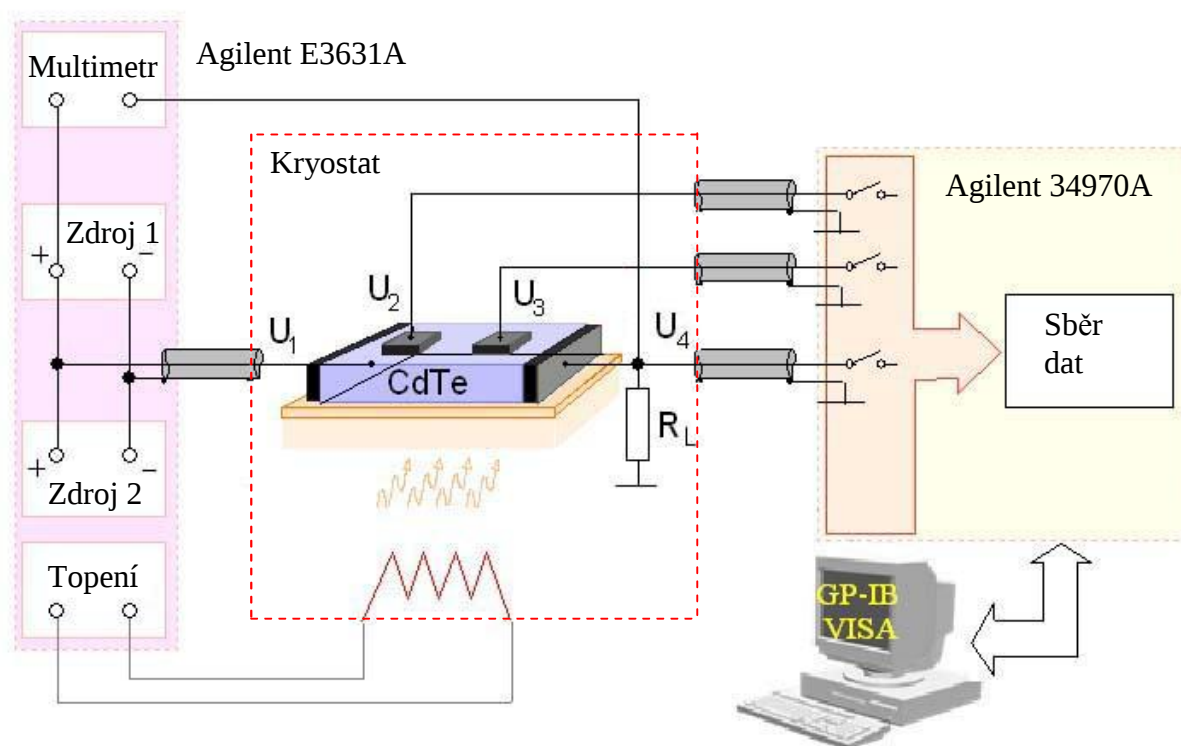
Na obrázku (Obr.3.2) jsou fotografie měřených vzorků. Zlaté plošky na vzorcích jsou vyvedené napěťové kontakty. Proudové kontakty jsou na čelních stranách vzorků.

4 Měření Volt-Ampérových charakteristik

Na vzorcích CdTe byly změřeny různé závislosti. Kromě Volt-Ampérových charakteristik se sledovala změna odporu vzorku na proudových i napěťových kontaktech při změnách teploty článku a také při stále teplotě v dlouhodobém časovém intervalu. Jako výchozí prvek byl použit nízkoohmový vzorek s označením F33B8. Je osazen 4 kontakty (2 napěťové a 2 proudové). Jedná se o materiál typu-*p* a připravil jej Fyzikální Institut Karlovy Univerzity v Praze. Rozměry vzorku činí: délka 11.4 mm, průřez (1.7 x 2.7) 4.59 mm². Další parametry jsou uvedeny v následující tabulce. Hodnoty byly změřeny při teplotě $T=300\text{K}$ a slouží pouze jako orientační přehled, protože změnou okolního prostředí se rychle mění.

Specifický odpor ρ	70 Ωcm
Koncentrace děr p	$1.2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Pohyblivost děr μ	73 cm^2/Vs
Koncentrace příměsi N_a	$2.4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Aktivační energie akceptorů	150-300 meV

Tab.4.1 Parametry vzorku F33B8



Obr.4.1 Schéma zapojení pro měření vzorek CdTe

Aparatura na obrázku (Obr.4.1) je určena pro měření transportních charakteristik CdTe monokrystalů. Vzorek se zatěžovacím odporem je umístěn uvnitř kryostatu. Hodnota zatěžovacího odporu $R_L = 33.7 \text{ k}\Omega$. Kryostat dovoluje kontrolovat teplotu vzorku v rozmezí od 77K do 400K pomocí topné spirály. Zároveň kryostat slouží k odstínění nežádoucích elektrických polí. Aparatura dovoluje odečítat napětí na kontaktech U1, U2, U3 a U4.

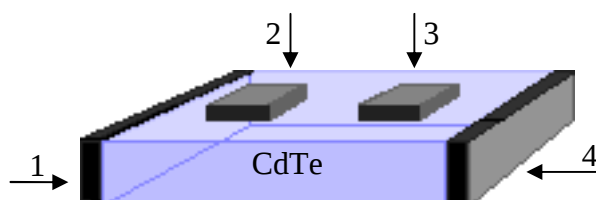
Programovací D/A převodník E3631A se používá k měření Volt-Ampérových charakteristik a měření závislosti proudu na čase. D/A převodník také slouží k automatickému udržování teploty na zadané úrovni uvnitř kryostatu. Oddělné proudové a napěťové kontakty jsou připojeny na multiplexor Agilent 34970A, jež přes konektor GPIB je připojen k počítači a slouží k A/D převodu naměřených dat.

4.1 První měření

První měření vzorků bylo provedeno v listopadu 2007. K dispozici byly 3 vzorky s označením F33B8, 452B a F35C3.

4.1.1 Vzorek F33B8

VA charakteristiky byly měřeny na proudových i napěťových kontaktech vzorku. Vstupní napětí bylo měněno v rozsahu od 0 – 16V. Teplota vzorku byla upravována po 10K v rozmezí 300K – 400K. Následuje obrázek vzorku CdTe s popisem kontaktů a dále naměřené charakteristiky pro vybraná měření. Jednotlivé křivky byly proloženy popsateľnou matematickou funkcí.



Obr.4.2 Označení kontaktů vzorku

Kontakty 1 a 4: Proudové

Kontakty 2 a 3: Napěťové

Mezi napěťovými kontakty má polovodič homogenní vlastnosti. K největšímu úbytku napětí dochází mezi kontakty 1-2. Oblasti mezi napěťovými a proudovými kontakty, tzn. oblasti 1-2 a 3-4 představují zapojení diod. Oblast mezi kontakty 1-2 představuje Schottkyho diodu v závěrném směru, proto se v této oblasti projeví největší úbytek napětí. Naproti tomu oblast mezi kontakty 3-4 představuje Schottkyho diodu ve směru propustném, úbytek napětí je minimální.

Matematické funkce proložených charakteristik (k Obr.4.3):

1. Měřeno pro $T=300\text{K}$, funkce popisující křivku:

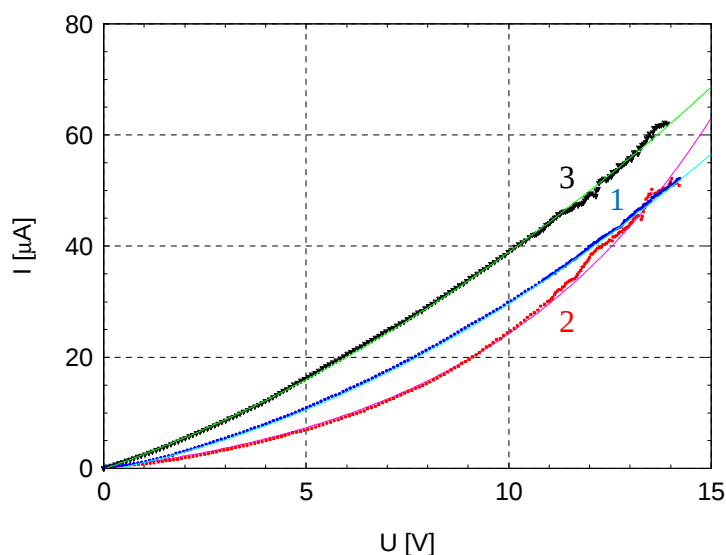
$$I = 17.9e^{(0.0964U - 1)}$$

2. Měřeno pro $T=340\text{K}$, funkce popisující křivku:

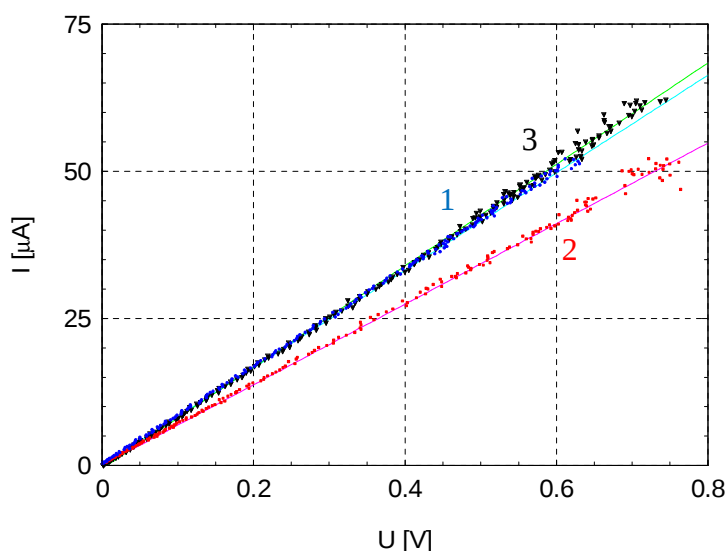
$$I = 5.64e^{(0.1667U - 1)}$$

3. Měřeno pro $T=400\text{K}$, funkce popisující křivku:

$$I = 42.2e^{(0.0650U - 1)}$$



Obr.4.3 Volt-Ampérové charakteristiky na proudových kontaktech pro vzorek F33B8



Obr.4.4 Volt-Ampérové charakteristiky na napěťových kontaktech pro vzorek F33B8

Matematické funkce proložených charakteristik (k Obr.4.4):

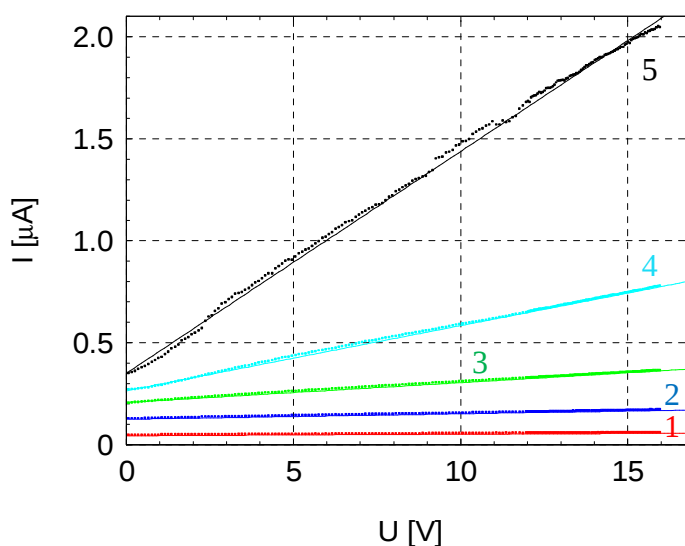
- | | |
|---|----------------------|
| 1. Měřeno pro $T=300\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 82.9U + 0.0205$ |
| 2. Měřeno pro $T=340\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 68.4U + 0.0328$ |
| 3. Měřeno pro $T=400\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 86.2U - 0.530$ |

U Volt-Ampérových charakteristik na proudových kontaktech jsou křivky lehce prohnuty do tvaru tangentoidy. Tento průběh je způsoben průchodem napětí přes oblasti mezi napěťovými a proudovými kontakty chovající se jako diody. Charakteristiky měřené na napěťových kontaktech vykazují přímo úměrný nárůst proudu aplikovanému napětí. Odpovídající odpor pro celý článek činí od $1\text{M}\Omega$ při nízkém vstupním napětí (do 3V). Poté lineárně klesá až k hodnotě $275\text{k}\Omega$. Na napěťových kontaktech kolísá $\pm 3\text{k}\Omega$ kolem hodnoty $12\text{k}\Omega$. Pro vybrané teploty odpovídaly hodnoty odporu:

1. $R=12062\ \Omega$, měřeno při $T=300\text{K}$
2. $R=14619\ \Omega$, měřeno při $T=340\text{K}$
3. $R=11600\ \Omega$, měřeno při $T=400\text{K}$

4.1.2 Vzorky 452B a F35C3

Pro srovnání naměřených hodnot byla provedena další měření Volt-Ampérových charakteristik vzorků s odlišnými parametry. Napájecí napětí bylo zvyšováno v intervalu $0 - 16\text{V}$. Oba vzorky jsou typu-n. 452B je vysokoohmový oproti F35C3, ten je nízkoohmový. Neobsahovaly napěťové kontakty, proto jsou všechny další charakteristiky měřeny pouze na celém článku, čili na jeho proudových kontaktech.

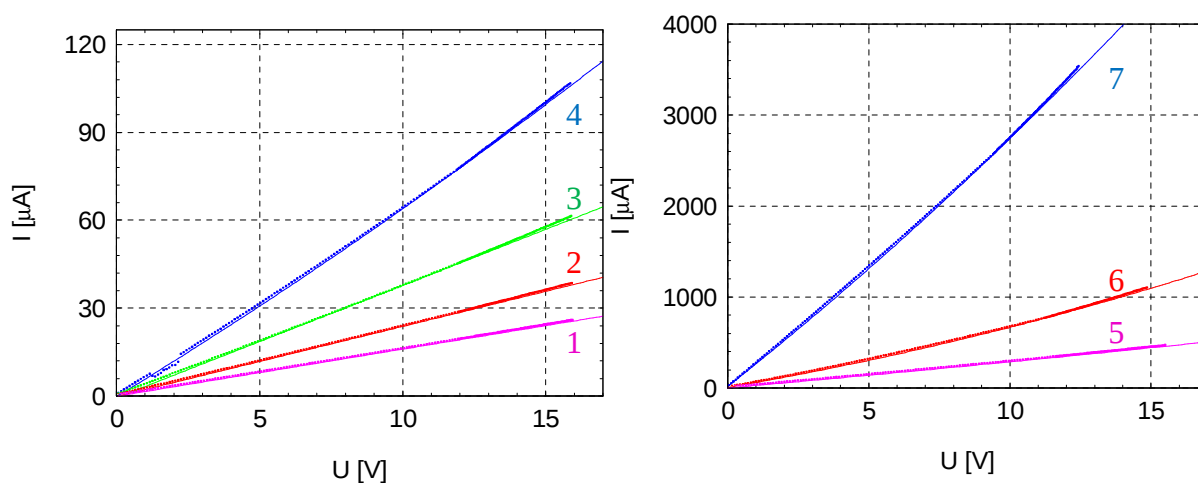


Obr.4.5 Volt-Ampérové charakteristiky na proudových kontaktech pro vzorek 452B

V porovnání s předchozími Volt-Ampérovými charakteristikami vzorku F33B8 si lze všimnout velice nízkých hodnot proudu procházejícím vzorkem. To je zapříčiněno odlišností vodivosti vzorků (nízkoohmový/vysokoohmový).

Matematické funkce proložených charakteristik (k Obr.4.5):

- | | |
|---|----------------------------|
| 1. Měřeno pro T=310K, funkce popisující křivku: | $I = 7.56e^{-4}U + 0.0443$ |
| 2. Měřeno pro T=330K, funkce popisující křivku: | $I = 2.68e^{-3}U + 0.1250$ |
| 3. Měřeno pro T=350K, funkce popisující křivku: | $I = 9.70e^{-3}U + 0.2070$ |
| 4. Měřeno pro T=370K, funkce popisující křivku: | $I = 3.19e^{-2}U + 0.2650$ |
| 5. Měřeno pro T=390K, funkce popisující křivku: | $I = 0.1090U + 0.3510$ |



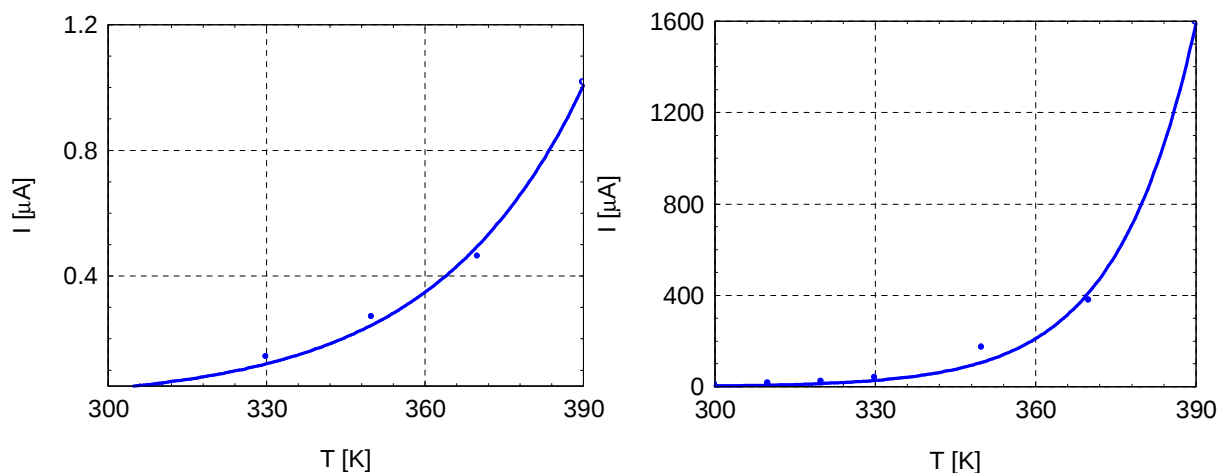
Obr.4.6 Volt-Ampérové charakteristiky na proudových kontaktech pro vzorek F35C3

Tento vzorek vykazuje nejvyšší průchod proudu, hodnoty jsou až o řád vyšší, než u předchozího vzorku. Jednotlivé charakteristiky vykazují rovněž téměř lineární nárůst.

Matematické funkce proložených charakteristik (k Obr.4.6):

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1. Měřeno pro $T=300\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 1.61U - 0.0635$ |
| 2. Měřeno pro $T=310\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 2.39U - 0.186$ |
| 3. Měřeno pro $T=320\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 3.83U - 0.565$ |
| 4. Měřeno pro $T=330\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 4.66e^{-2}U^2 + 5.95U - 0.208$ |
| 5. Měřeno pro $T=350\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 1.57e^{-1}U^2 + 27.0U + 1.33$ |
| 6. Měřeno pro $T=370\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 1.31U^2 + 52.900U + 6.88$ |
| 7. Měřeno pro $T=390\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 2.77U^2 + 245.0U + 18.9$ |

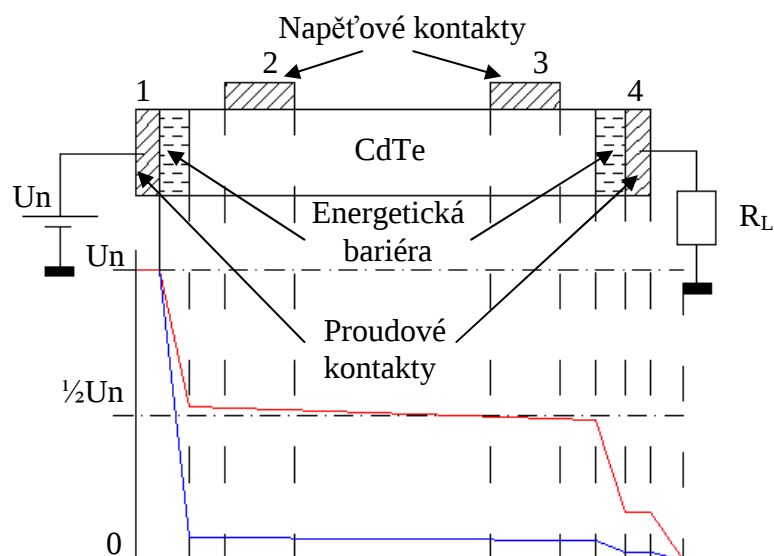
Následující obrázky představují změny proudu, protékajícím vzorkem. Byl zvolen pracovní bod, jehož napájecí napětí odpovídá výši 6V. Hodnoty zahrnují měření všech teplot v intervalu 300K – 400K po kroku 10K. Dle změřených hodnot lze určit logaritmický nárůst proudu se zvyšováním teploty vzorku.



Obr.4.7 Závislost proudu na teplotě pro konstantní napájecí napětí $U=\text{konst}=6\text{V}$ pro vzorky 452B (vlevo) a F35C3 (vpravo)

Matematické funkce proložených charakteristik (k Obr.4.7):

- | | |
|---|--------------------------|
| 1. Měřeno pro vzorek 452B, funkce popisující křivku: | $I = 1.03e^{-6}(T/28.6)$ |
| 2. Měřeno pro vzorek F35C3, funkce popisující křivku: | $I = 6.35e^{-9}(T/14.9)$ |



Obr.4.8 Grafické znázornění úbytku napětí na vzorku

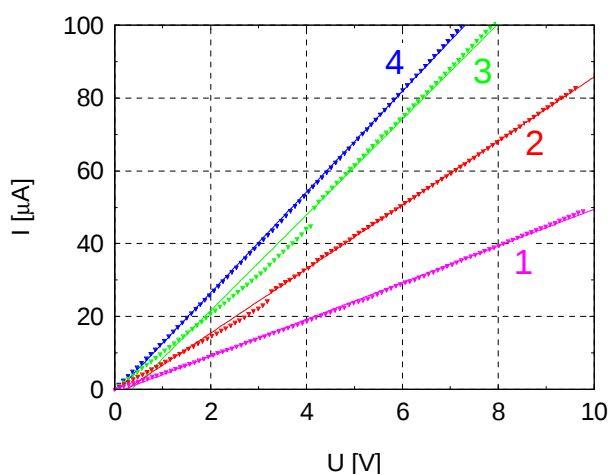
Obrázek (Obr.4.8) nám naznačuje úbytek napětí v jednotlivých částech CdTe vzorku. V tomto případě byl použit vzorek s označením F33B8. Jedná se o dvojí měření. Modrá křivka znázorňuje starší měření (květen 2006), červená pak novější měření (listopad 2007). Úbytky napětí jsou v místech vyprázdněné oblasti polovodiče. Mezi těmito oblastmi má polovodič takřka stejné odporové vlastnosti, čili úbytek napětí je minimální.

4.2 Druhé měření

Podobně jako při měření v listopadu 2007 byli Volt-Ampérové charakteristiky měřeny také v březnu 2008. Abychom mohli získané charakteristiky mezi sebou porovnávat, bylo nutno připravit stejné podmínky pro obě měření. V obou případech byly k veškerému měření a zpracování dat použity stejné přístroje a PC. Vstupní napětí bylo měněno opět v rozsahu 0 – 16V. V těchto závislostech byla měněna teplota 30 – 120°C s krokem 30°C. Každé měření bylo provedeno 3 krát.

4.2.1 Vzorek F33B8

Na tomto vzorku bylo provedeno nejvíce měření, protože vzorek již od počátku práce obsahoval všechny kontakty (proudové i napěťové). V této kapitole již nebude vzorek podroben měření odporu mezi jednotlivými kontakty, ale pouze pro srovnání byly opětovně změřeny Volt-Ampérové charakteristiky. Pro následující měření je vstupní napětí nastaveno v rozmezí 0 – 10V.

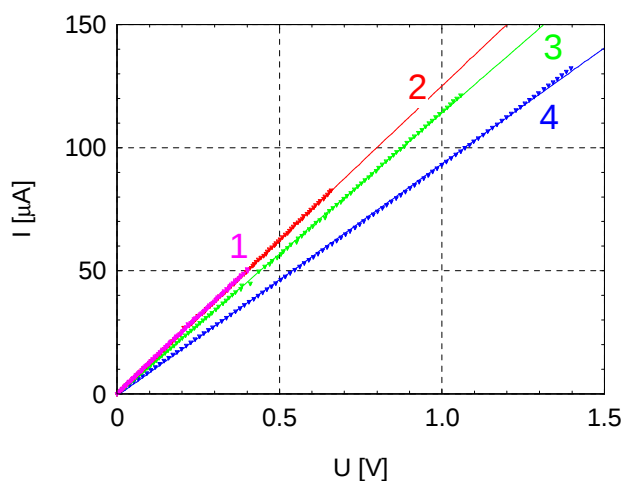


Obr.4.9 Volt-Ampérové charakteristiky na proudových kontaktech pro vzorek F33B8

Matematické funkce proložených charakteristik (k Obr.4.9):

- | | |
|---|--------------------|
| 1. Měřeno pro $T=303\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 5.04U - 0.99$ |
| 2. Měřeno pro $T=333\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 8.79U - 2.16$ |
| 3. Měřeno pro $T=363\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 13.1U - 4.68$ |
| 4. Měřeno pro $T=393\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 13.8U - 1.20$ |

Porovnáním těchto naměřených charakteristik s hodnotami získanými v listopadu 2007 (Obr.4.3) je vidět, že velikosti protékajícího proudu je v obou případech do $100\mu\text{A}$. Zajímavým faktem je, že v tomto měření je zřejmý nárůst protékajícího proudu se zvyšující se teplotou. U měření v listopadu 2007 tento jev nebyl zřetelný.



Obr.4.10 Volt-Ampérové charakteristiky na napěťových kontaktech pro vzorek F33B8

Matematické funkce proložených charakteristik (k Obr.4.10):

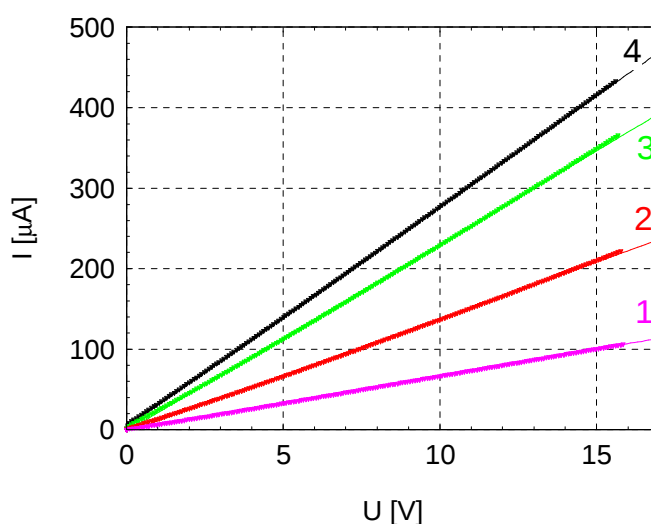
- | | |
|---|---------------------|
| 1. Měřeno pro $T=303\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 125U - 0.031$ |
| 2. Měřeno pro $T=333\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 125U - 0.031$ |
| 3. Měřeno pro $T=363\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 114U - 0.399$ |
| 4. Měřeno pro $T=393\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 94.1U - 0.755$ |

Při tomto měření bylo dosaženo velmi obdobných výsledků, jako v listopadu 2007 (Obr.4.4). Naměřené hodnoty proudu jsou v tomto případě nižší, ale sklon charakteristik je velice podobný. U tohoto vzorku nezapříčiňuje růst teploty zvýšení vodivosti, avšak nejvyšších hodnot naměřeného napětí (nejmenšího úbytku) je právě za nejvyšších teplot. Hodnota proudu se zvyšuje.

4.2.2 Vzorek F35C3

Tento vzorek při měření v listopadu 2007 neobsahoval napěťové kontakty, proto jsou charakteristiky z předchozích měření získány pouze z proudových kontaktů. Vzorek byl mezitím nakontaktován a tudíž následuje měření na všech kontaktech.

Tato kapitola se věnuje opakovanému měření uvedeného vzorku. Následuje měření VA charakteristiky na proudových kontaktech. Hodnoty jsou odečítány na celém vzorku. Projevuje se veškerý úbytek a tím také odpor mezi jednotlivými kontakty.



Obr.4.11 Volt-Ampérová charakteristika na proudových kontaktech pro vzorek F35C3

Matematické funkce proložených charakteristik (k Obr.4.11):

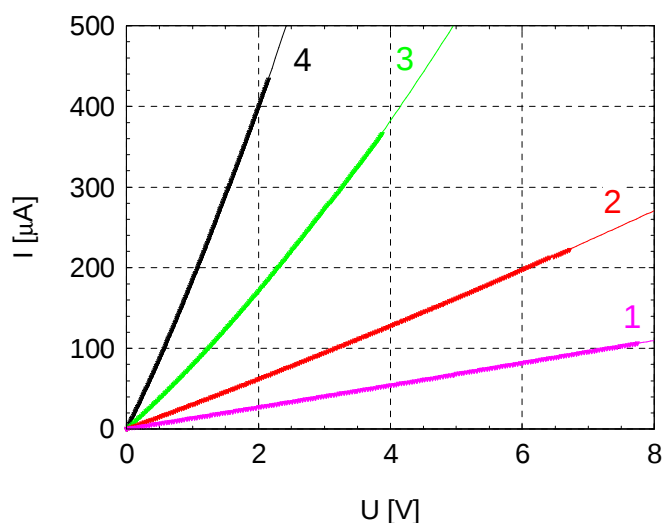
- | | |
|---|----------------------------|
| 1. Měřeno pro $T=303\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 1927e^{(0.00692U-1)}$ |
| 2. Měřeno pro $T=333\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 1058e^{(0.0285U-1)}$ |
| 3. Měřeno pro $T=363\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 713e^{(0.107U-1)}$ |
| 4. Měřeno pro $T=393\text{K}$, funkce popisující křivku: | $I = 1088e^{(0.156U-1)}$ |

Nastavené teploty se mírně liší od teplot při měření v listopadu 2007. Důležitým poznatkem je však růst vodivosti se zvyšující se teplotou. Zatímco v předchozím měření (listopad 2007) se křivky křížily, v tomto případě mají jasný charakter poklesu odporu s nárůstem teploty. V porovnání však s měřením v listopadu 2007 (Obr.4.6), se hodnoty naměřeného odporu liší. Bližší porovnání znázorňuje následující tabulka. Hodnoty jsou odečteny pro napájecí napětí $U_N=10\text{V}$.

Měřeno: listopad 2007		Měřeno: březen 2008	
Teplota [K]	R [kΩ]	Teplota [K]	R [kΩ]
300	625	303	149
330	156	333	72
370	15	363	43
390	3.6	393	36

Tab.4.2 Porovnání velikosti odporu na napěťových kontaktech

Zatímco vypočtené hodnoty odporu z Volt-Ampérových charakteristik naměřených v listopadu 2007 vykazují rozptyl od 625kΩ při teplotě 300K až k hodnotě 3.6kΩ při teplotě 390K, nové měření vykazuje rozdíly hodnot pouze v rámci několika desítek kiloohmů. Nicméně řádově zůstaly hodnoty nezměněny. Číselné rozdíly mohla zapříčinit změna parametrů při kontaktování současně se stárnutím vzorku.



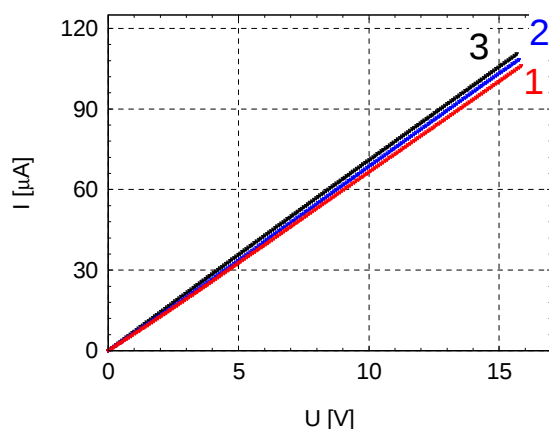
Obr.4.12 Volt-Ampérová charakteristika na napěťových kontaktech pro vzorek F35C3

Matematické funkce proložených charakteristik (k Obr.4.12):

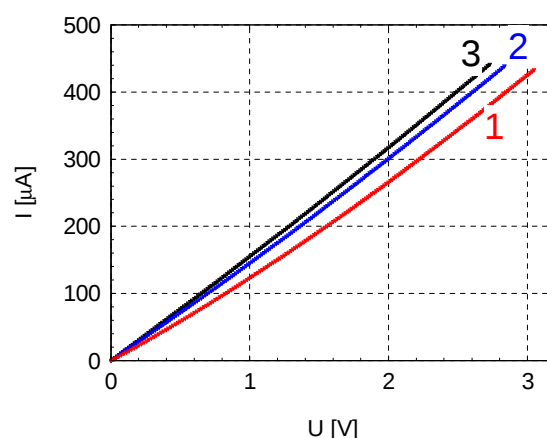
1. Měřeno pro $T=303\text{K}$, funkce popisující křivku: $I = 6.73U - 0.808$
2. Měřeno pro $T=333\text{K}$, funkce popisující křivku: $I = 14.1U - 2.96$
3. Měřeno pro $T=363\text{K}$, funkce popisující křivku: $I = 23.2U - 1.98$
4. Měřeno pro $T=393\text{K}$, funkce popisující křivku: $I = 27.4U + 3.16$

V tomto měření je opět vidět nárůst vodivosti se zvyšující se teplotou. Všechny charakteristiky mají lineární průběh.

Jelikož každé měření ve všech teplotách bylo prováděno vícekrát, bylo možno jednotlivé průběhy porovnat mezi sebou. Je vidět, že i když opakované měření následovalo ihned po skončení prvního, naměřené charakteristiky se od sebe odkláněly. Pro představu jsou vybrány dvě měření za nejnižší a nejvyšší teploty 303K a 393K.



Obr.4.13 Rozptyl křivek při teplotě 303K

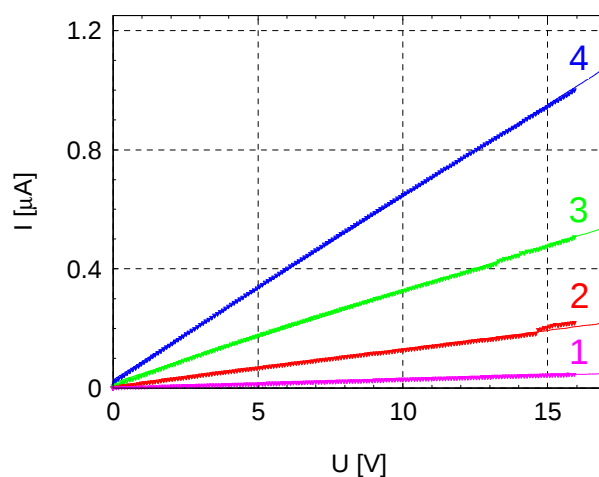


Obr.4.14 Rozptyl křivek při teplotě 393K

Obě měření byla prováděna na napěťových kontaktech. Při teplotě 303K nebyl rozptyl křivek příliš patrný. Avšak při teplotě 393K je jasně znatelný. Čísla v grafech označují pořadí, v jakém byly křivky získány. Tyto odchylky, získány za stejných podmínek, lze zdůvodnit přítomností příměsových hladin a jejich vlivu. Touto problematikou se zabývá kapitola 6.

4.2.3 Vzorek 452B

U tohoto vzorku bylo v listopadu 2007 ze stejných důvodů jako u předchozího vzorku provedeno měření pouze na jeho proudových kontaktech. Vzorek byl však také nakontaktován a nové měření bylo provedeno na všech kontaktech.

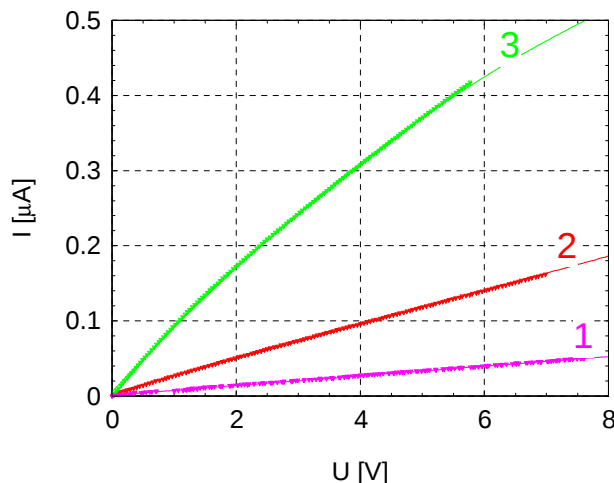


Obr.4.15 Volt-Ampérové charakteristiky na proudových kontaktech pro vzorek 452B

Matematické funkce proložených charakteristik (k Obr.4.15):

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. Měřeno pro $T=303K$, funkce popisující křivku: | $I = 0.003U - 5.78e^{-4}$ |
| 2. Měřeno pro $T=333K$, funkce popisující křivku: | $I = 0.013U + 0.002$ |
| 3. Měřeno pro $T=363K$, funkce popisující křivku: | $I = 0.031U + 0.018$ |
| 4. Měřeno pro $T=393K$, funkce popisující křivku: | $I = 0.062U + 0.027$ |

Porovnáním získaných průběhů z listopadu 2007 (Obr.4.5) a z března 2008 (Obr.4.15), je vidět stejný charakter lineárního nárůstu proudu se zvyšujícím se napětím. Nově změřené charakteristiky však vykazují nižší sklon a ve výsledku nižší tekoucí proud vzorkem. Rozdíl hodnot naměřeného proudu je přibližně poloviční.



Obr.4.16 Volt-Ampérová charakteristika na napět'ových kontaktech pro vzorek 452B

Matematické funkce proložených charakteristik (k Obr.4.16):

1. Měřeno pro $T=303\text{K}$, funkce popisující křivku: $I = 0.006U - 9.7e^{-4}$
2. Měřeno pro $T=333\text{K}$, funkce popisující křivku: $I = 0.023U + 0.004$
3. Měřeno pro $T=363\text{K}$, funkce popisující křivku: $I = -0.003U^2 + 0.089U + 0.006$

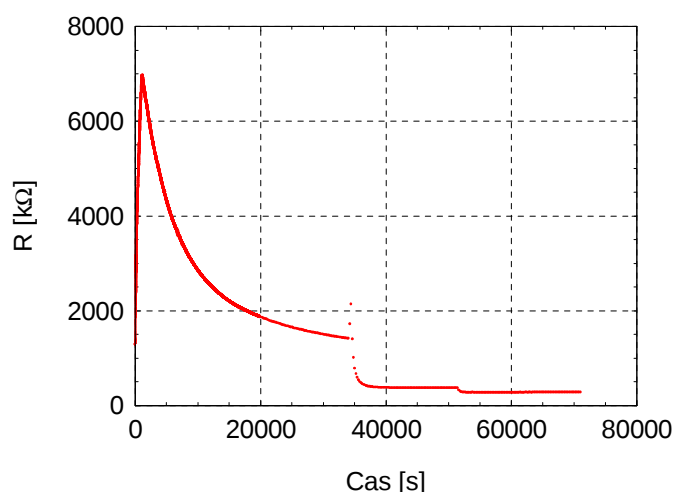
Volt-Ampérová charakteristiky na napět'ových kontaktech byly měřeny také při teplotě 120°C (393K), křivka však vlivem přístrojů vykazovala rozkmit. Z tohoto důvodu není v grafu zařazena. Průběh charakteristik nelze porovnat jako u vzorku F33B8 s předchozím měřením, jelikož obrázek Obr.4.16 představuje teprve první naměřené charakteristiky tohoto vzorku. Průběhy vykazují lineární závislost nebo lehký prohyb. Oproti měření závislosti na proudových kontaktech (Obr.4.15) je napětí na napět'ových kontaktech nižší. To je způsobeno úbytkem mezi napět'ovým a proudovým kontaktem.

5 Měření odporu vzorku F33B8

5.1 První měření

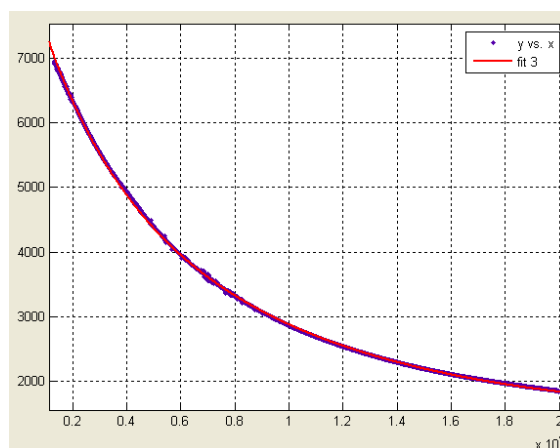
V rámci této práce je sledovat vlastnosti vzorku s postupujícím časem. Jako klíčový průběh je závislost odporu vzorku na napět'ových kontaktech mezi piny 2-3. Mezi tyto kontakty dopadá záření, které ovlivňuje celkovou vodivost polovodiče. Tato problematika bude blíže popsána kapitole 7.

V následujících měřeních je sledováno chování odporu článku. Odpor byl sledován na napět'ových kontaktech. Teplota má hodnotu 30°C (303K) a napájecí napětí je konstantní $U_N=16\text{V}$.



Obr.5.1 Měření odporu na napěťových kontaktech v lineárním zobrazení pro vzorek F33B8

Tato závislost byla naměřena v květnu 2006. Závislost je vyobrazena v lineárním měřítku, protože zobrazuje přechodové jevy, které by při logaritmickém zobrazení deformovaly průběh křivky. První přechodový jev je vidět hned na začátku průběhu. Odpor prudce vzroste na hodnotu přibližně 7 MΩ. Poté následuje typický pokles, který se postupně asymptoticky směřuje k hodnotě 1.5 MΩ. V této závislosti však byla po necelých 10 hodinách měření zvýšena teplota ze 30°C na 110 °C. Na tomto místě (33000s) je vidět další přechodový jev. Kryostat není schopen teplotu měnit skokově a zahřátí vzorku mu zabere přibližně 100s. Je vidět náhlý pokles odporu. Třetí přechodový jev je vidět kolem hodnoty 52000s (14h). V tomto čase byla opět změněna teplota na původní hodnotu 30°C. Odpor vzorku na napěťových kontaktech však ještě mírně klesl.



Obr.5.2 proložení části charakteristiky zobrazené obrázkem Obr.5.1

Obrázek (Obr.5.2) ukazuje proložení křivky poklesu odporu, než dojde do ustáleného stavu. Funkce, která prokládá tuto závislost:

$$R = 100^{(-t/t_1)} + 100^{(-t/t_2)} + 100^{(-t/t_3)} + c \quad (5.1)$$

Výsledná funkce je součet tří stejných funkcí. V každé z těchto tří částí je určitá časová konstanta τ .

$$\tau_1 = 2500\text{s}$$

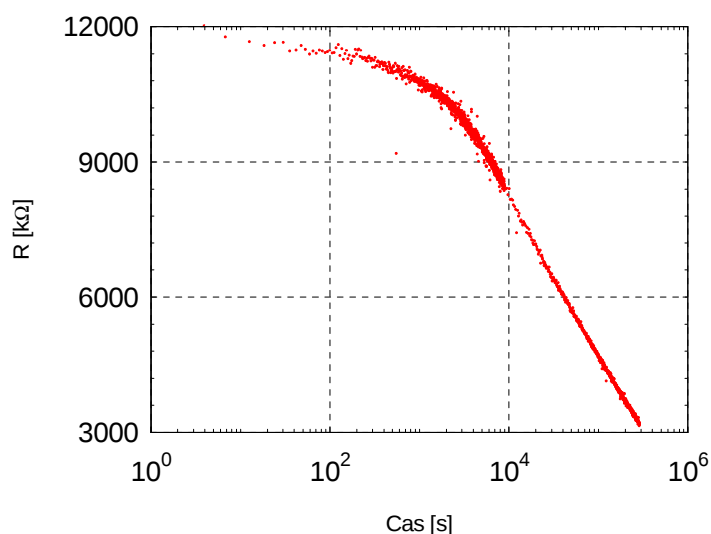
$$\tau_2 = 4695\text{s}$$

$$\tau_3 = 15270\text{s}$$

Tyto konstanty umožňují získat časový údaj, ve kterém je průběh funkce nejvíce ovlivněn příměsovými hladinami mezi valenčním a vodivostním pásem. Tuto problematiku vysvětluje následující kapitola.

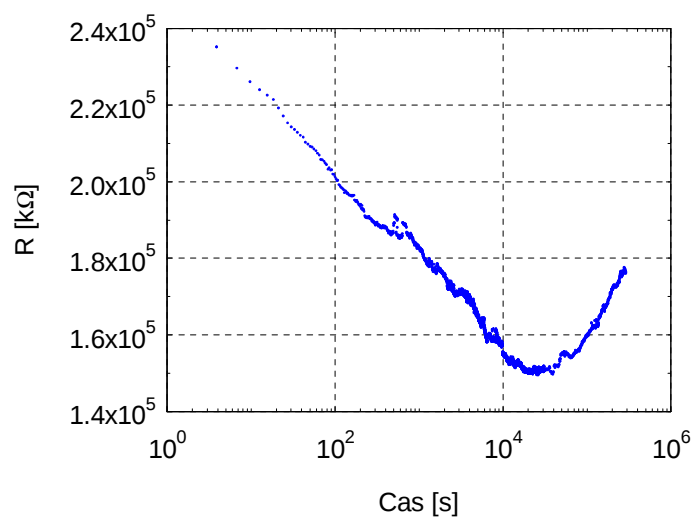
5.2 Druhé měření

Následující měření bylo provedeno v listopadu 2007. Bylo sledováno chování odporu článku. Odpor byl měřen na celém článku a také mezi jednotlivými kontakty 1-4 (viz Obr.4.2). Teplota byla nastavena na hodnotu 300K a napájecí napětí konstantní $U_N=16\text{V}$.

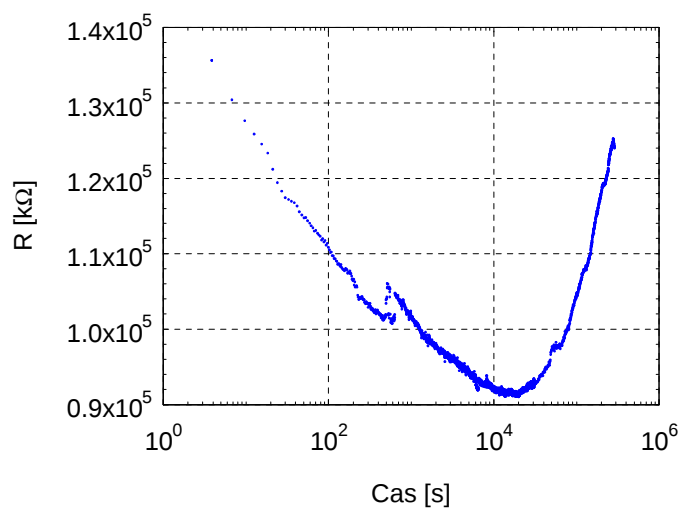


Obr.5.3 Měření odporu na napěťových kontaktech v log. zobrazení pro vzorek F33B8

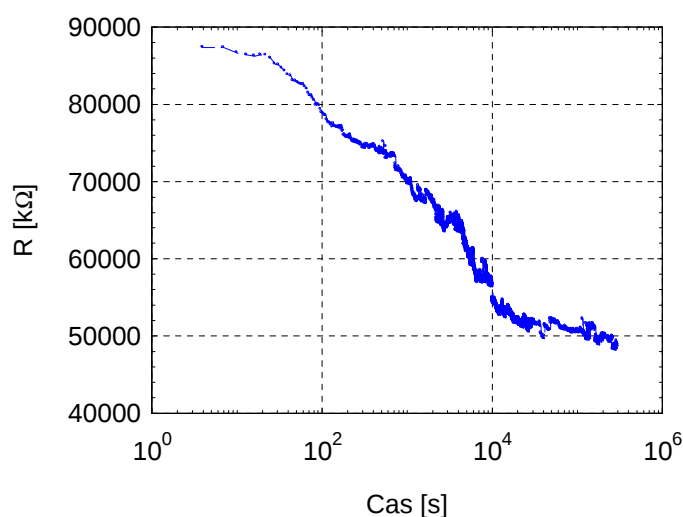
Při logaritmickém zobrazení časové osy vykazuje odpor přibližně po 20 minutách měření lineární pokles



Obr.5.4 Měření odporu na proudových kontaktech pro vzorek F33B8

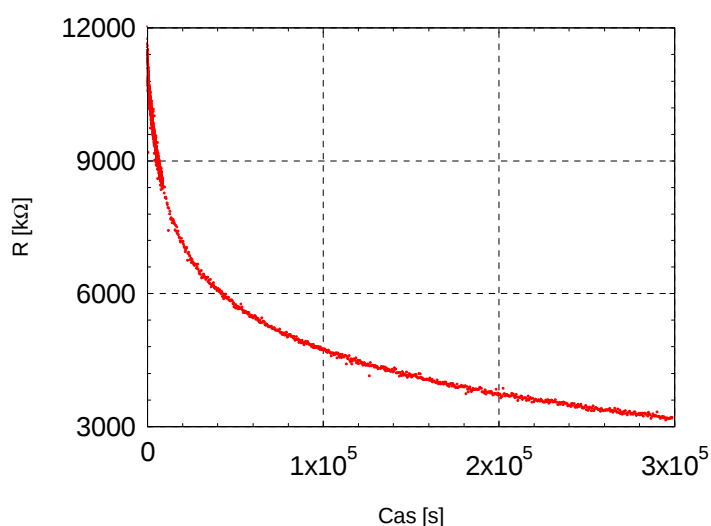


Obr.5.5 Měření odporu mezi proudovým a napěťovým kontaktem 1-2 pro vzorek F33B8



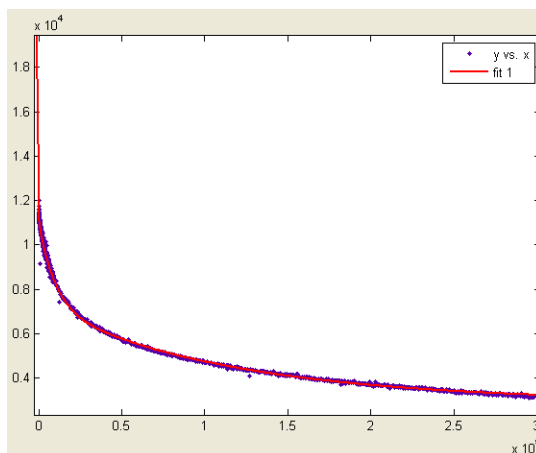
Obr.5.6 Měření odporu mezi proudovým a napětovým kontaktem 3-4 pro vzorek F33B8

Následuje opět vyobrazení velikosti odporu v závislosti na čase na napětových kontaktech. Tato závislost je již vyobrazena na obrázku Obr.5.3. V následujícím případě se však jedná o lineární zobrazení pro možnost porovnání s měřením v květnu 2006 a dalšího zpracování. Pro připomenutí: teplota je 300K, $U_N=16V$, listopad 2007.



Obr.5.7 Měření odporu na napětových kontaktech v lineárním zobrazení pro vzorek F33B8

Měření v květnu 2006 je narušeno měněním teplot, avšak až po přibližně 10 hodinách měření. Do této doby vykazují obě charakteristiky obdobný průběh. Odlišné hodnoty odporu lze přiřadit právě rozdílu teplot obou měření ($3^\circ C$).



Obr.5.8 Proložení charakteristiky zobrazené obrázkem Obr.5.7

Jako prokládací funkce je použita rovnice 4.1. Byly získány opět tři časové konstanty τ .

$$\tau_1 = 375\text{s}$$

$$\tau_2 = 9525\text{s}$$

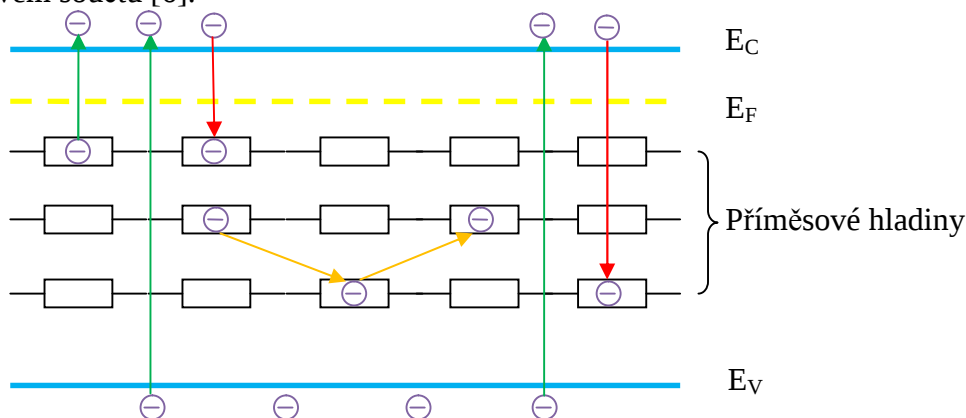
$$\tau_3 = 11360\text{s}$$

6 Příměsové hladiny

Mezi hladinou valenčního pásu a vodivostního pásu se kromě Fermiho vrstvy nachází další hladiny. Tyto hladiny ovlivňují celkovou vodivost vzorku. Jejich počet nelze jednoznačně určit. Každá z těchto hladin ovlivňuje vodivost polovodiče v určitém časovém intervalu. K nalezení alespoň přibližné časové hodnoty, ve které energie hladiny nejvíce působí na vodivost, pomůže prokládací funkce. Jelikož vodivost úzce souvisí s odporem, proloží se závislost odporu na čase. V našem případě to bude odpor mezi napět'ovými kontakty (2-3). Pro kopírování průběhu odporové křivky lze použít exponenciální funkci:

$$R = a^{(-t/\tau)} + c \quad (6.1)$$

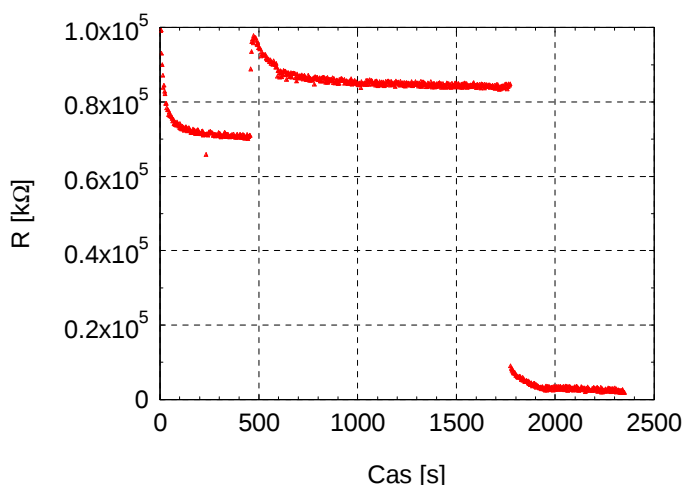
Funkci lze řadit do součtu za sebou a tvarovat tak výsledný průběh prokládané křivky, dokud se časová závislost odporu neproloží takřka ideálně. Při uspokojivém výsledku dostaneme několik časových konstant τ . Jejich počet závisí na počtu funkcí, které jsou v celkovém součtu [6].



Obr.6.1 Příměsové hladiny

Ve valenčním pásu E_V se nacházejí elektrony, které při dostatečné energii mohou překonat bariéru a přeskočit do pásu vodivostního E_C . Tím se stane materiál vodivým. Tato vlastnost je znázorněna na obrázku Obr.6.1 zelenými šipkami. Vodivost se zvýší také tehdy, přeskočí-li elektron z jakékoliv příměsové hladiny do vodivostního pásu. Elektrony mohou však přeskakovat zpět z pásu vodivostního do některé z příměsových hladin. Tím se odpor materiálu zvýší, a tudíž vodivost klesne – vyobrazeno červenými šipkami. Elektrony mohou přeskakovat také mezi hladinami příměsovými. Jelikož však nedosáhly vodivostního pásu, neprojeví se na celkové vodivosti materiálů – oranžové šipky.

Hladiny nejsou vždy zaplněny stejnými počty elektronů. Je-li polovodič v nečinnosti, tzn., nejsou-li prováděna žádná měření a není připojeno napětí, jsou tyto hladiny obsazeny zřídka. Při každém měření je na vzorek připojeno napětí. To způsobí pohyb elektronů z valenčního pásu do vodivostního a taky zvýší aktivitu elektronů, které se posouvají z nižších příměsových hladin směrem nahoru. Popřípadě přejdou až do vodivostního pásu. Při odpojení externího napájení se elektrony začnou pohybovat opačným směrem. Z vodivostního pásu klesají do příměsových hladin. Z horních příměsových hladin se přesouvají do nižších. Čím déle zůstává vzorek v klidu, tím více elektronů se stihne přesunout. Provádíme-li několik měření v krátkém časovém úseku, může nastat případ, kdy za stejných měřicích podmínek dostaneme různých výsledků [10]. Tuto situaci prezentuje následující obrázek Obr.6.2.



Obr.6.2 Různé obsazení příměsových hladin

Tento obrázek (Obr.6.2) zobrazuje závislost odporu mezi napěťovými kontakty na čase. Přesnou velikost změřeného odporu nyní pomineme. Na počátku je vzorek měřen se zapnutým osvětlením s nastavenou citlivou vlnovou délkou. Odpor se ustaluje kolem hodnoty $70\text{M}\Omega$. V čase 462 sekund je osvětlení vypnuto. Odpor se zvýší a ustaluje kolem $85\text{M}\Omega$. Po 30 minutách měření je opět osvětlení zapnuto. Vzorek má stejné podmínky jako na začátku měření. Zřetelně jde však vidět, že odpor se ustaluje kolem hodnoty $2\text{M}\Omega$. Toto měření potvrzuje různé obsazení příměsových hladin za odlišných počátečních podmínek.

Jak již bylo zmíněno, přesný počet hladin není znám a jejich přibližný počet lze získat z prokládací funkce odporové charakteristiky. V našem případě byla odporová závislost na čase měřená v květnu 2006 proložená funkcí 6.1. Skládá se ze tří stejných součtových vztahů. V každém z nich je časová konstanta τ , která přiblíží časový okamžik nejvíce ovlivňující průběh křivky.

Vypočtené časové konstanty jsou tedy:

$$t_1 = 2500s$$

$$t_2 = 4695s$$

$$t_3 = 15270s$$

Lze vyvodit, že příměsové hladiny byli tři. První z nich začala nejvíce ovlivňovat vodivost vzorku v čase 2500s (přibližně 40 minut). Druhá pak v čase 4695s (1.3 hodiny) a poslední v čase 15270 (4.2 hodiny).

V případě měření provedené v listopadu 2007 dostáváme výslednou prokládací funkci také součtem třech exponencionálních vztahů. Výsledné časové konstanty τ činily v tomto případě:

$$\tau_1 = 375s$$

$$\tau_2 = 9525s$$

$$\tau_3 = 11360s$$

Při porovnání vidíme, že jednotlivé časové konstanty se liší. Tato změna může být způsobena rozdílem teplot obou měření (3°C) a tudíž odlišnou vodivostí vzorku.

Jelikož při prokládání závislosti hledáme přibližnou funkci, jsou tyto časové údaje pouze odhadem přibližných časových úseků. Neznamená to však v žádném případě, že přesně v okamžiku τ_1 bude první příměsová hladina výrazně ovlivňovat odpor vzorku.

7 Vlastnosti polovodiče při osvětlení

Charakteristickou vlastností polovodičů je závislost koncentrace volných nosičů náboje na teplotě. Koncentraci volných nosičů lze však také zvětšit působením záření. Při osvětlení polovodiče může dojít k vnějšímu fotoelektrickému jevu (projevuje se emisí elektronů do vakua) nebo k vnitřnímu fotoelektrickému jevu, při němž energie fotonu nestačí k uvolnění elektronu mimo krystal polovodiče.

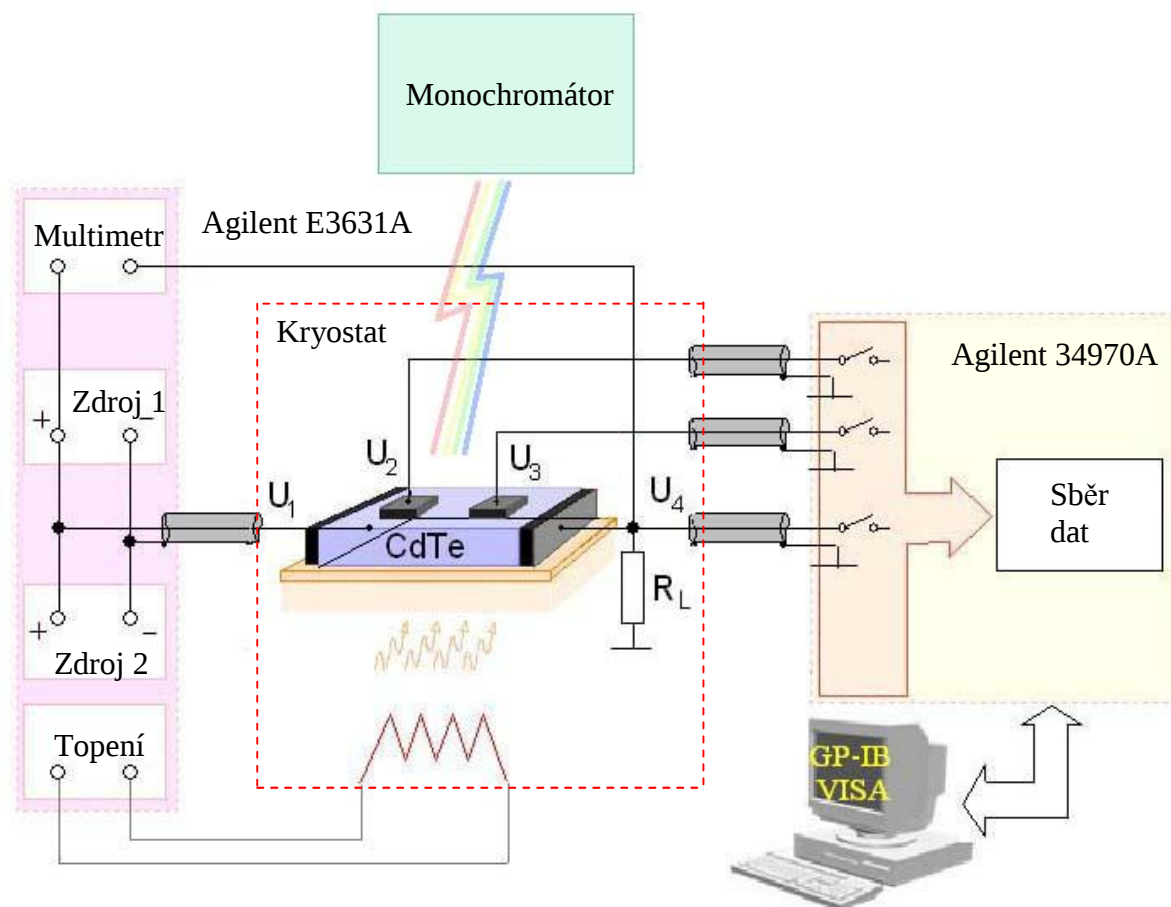
Vnitřní fotoelektrický jev se dále dělí na dva druhy:

a) Fotovodivost. Dodáme-li elektronu dostatečnou energii, překoná elektron zakázaný pás a přejde z valenčního do vodivostního pásu. Je-li osvětlen polovodič světlem, jehož fotony mají energii větší než je šířka zakázaného pásu, generují se v polovodiči nové páry nosičů elektrického proudu, což má za následek zvýšení vodivosti polovodiče. Fotovodivost se využívá u fotorezistorů.

b) Fotovoltaický jev (nazývaný též hradlový). Při tomto jevu se spotřebuje energie dopadajících kvant na přechod elektronů (nacházejících se ve vodivostním pásu) přes potenciálovou bariéru přechodu PN dvou polovodičů. Na přívozech k polovodičům pak vznikne elektrické napětí úměrné velikosti osvětlení přechodu. Tohoto jevu využívá hradlový fotoelektrický článek a fotodioda [12].

8 Měření vzorku při osvětlení

Všechny doposud uvedené měření a z nich získané charakteristiky byly provedeny bez působení světelného záření. Následující zkoumání vlastností prvku je již při působení světelného záření.

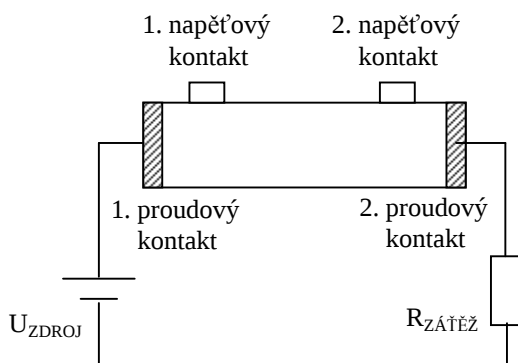


Obr.8.1 Schéma zapojení pro měření vzorek CdTe s monochromátorem

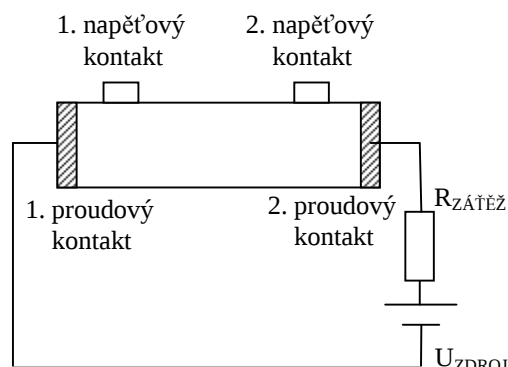
Použitá měřicí technika je shodná se zapojením při měření charakteristik CdTe bez působení světla. Do zapojení přibyl monochromátor. Konkrétně byl použit přístroj s označením CARLZEISS JENA 408021. Toto zařízení rozkládá díky několika hranolům světelné záření, které je z vnějšku dodáváno žárovkou. V našem případě bylo zařízení schopno měnit vlnovou délku v rozmezí $\lambda=350\text{nm} - 6000\text{nm}$ po dostatečně nízkých krocích.

8.1 Zapojení vzorku v přímém a zpětném směru

Při měření s osvětlením je nutné rozlišovat směr zapojení toku napětí.



Obr.8.2 Zapojení vzorku v přímém směru

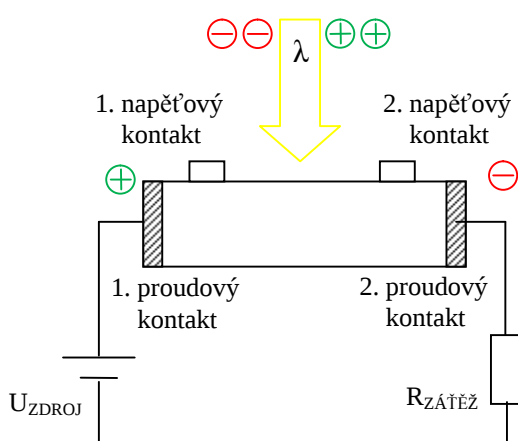


Obr.8.3 Zapojení vzorku ve zpětném směru

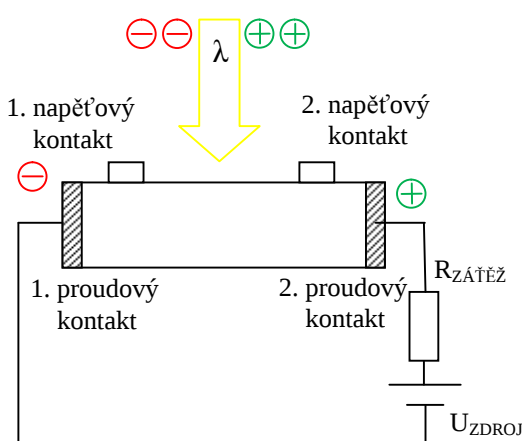
Vzorek je možno zapojit v přímém a zpětném směru. V zapojení přímém (Obr.8.2) je na první proudový kontakt připojeno kladné napětí zdroje. Mezi tímto proudovým kontaktem a nejbližším napěťovým vznikne určitý úbytek napětí. Dále následuje oblast, na kterou působí záření. Ta je ukončena druhým napěťovým kontaktem. Potom dochází k dalšímu úbytku napětí na části vzorku, která je ukončena druhým kontaktem proudovým. Při vypnutí osvětlení dochází postupně na jednotlivých kontaktech k úbytku napětí dodávaného zdrojem.

V zapojení zpětném (Obr.8.3) je zdroj napětí připojen z opačné strany. To znamená na druhý proudový kontakt. Veškeré úbytky napětí nastávají obdobně také v tomto případě za předpokladu, je-li vypnuto osvětlení.

Při aktivaci osvětlení a nastavení vlnové délky, na kterou je vzorek citlivý se však v obou variantách zapojení (přímé/zpětné) objeví rozdíly.



Obr.8.4 Zapojení vzorku v přímém směru s osvětlením



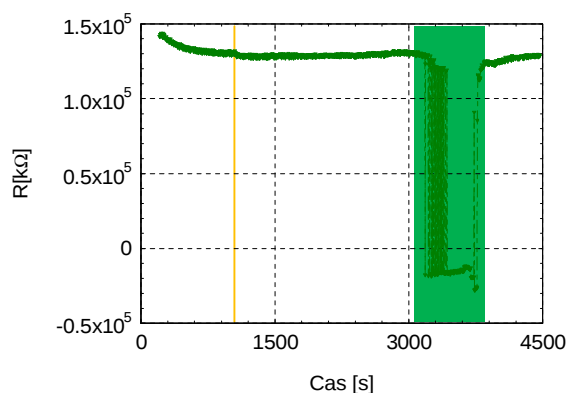
Obr.8.5 Zapojení vzorku ve zpětném směru s osvětlením

V přímém zapojení nastane v oblasti dopadu záření (oblast mezi napětovými kontakty) k dodávání elektrické energie (v podobě napětí) v opačném směru, než síťový zdroj. Napětí dodané ze světelného zdroje může být vyšší, než napětí na těchto kontaktech bez osvětlení. Nastane situace, že měřený odpor v této oblasti začne nabývat záporných hodnot. V zapojení zpětném je polarita napětí přijatého ze světelného záření stejná, jako polarita zdroje. Proto nedochází ke změnám odporu mezi napětovými kontakty do záporných hodnot. Znázorněno obrázky Obr.8.4 a Obr.8.5.

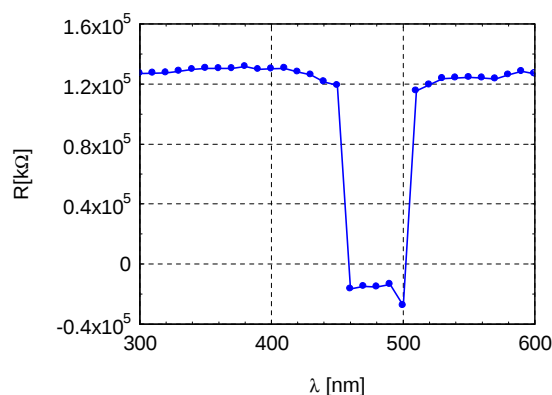
8.2 Zapojení vzorku 452B v přímém směru

8.2.1 Hledání vlnové délky

V prvním kroku při měření s osvětlením bylo nutné najít v pásmu vlnové délky λ , které dovoluje nastavit monochromátor, takový interval, ve kterém bude vzorek vykazovat změny vodivosti. Je měřen odpor mezi napětovými kontakty. Napájecí napětí je 16V.



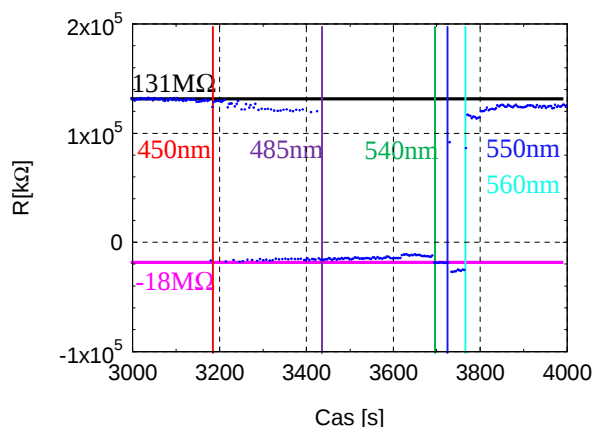
Obr.8.6 Hledání citlivé vlnové délky v přímém směru pro vzorek 452B, časová závislost



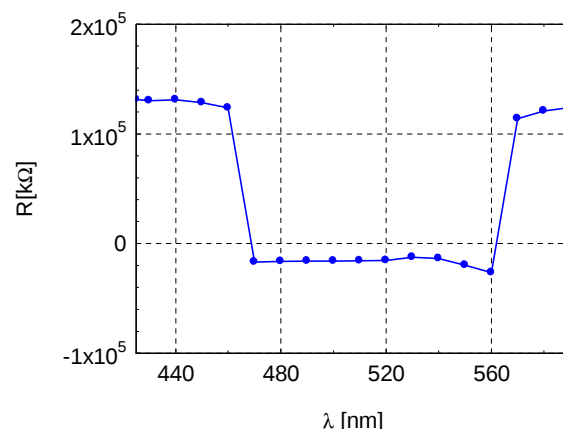
Obr.8.7 Hledání citlivé vlnové délky v přímém směru pro vzorek 452B, rozložení vlnových délek

Na začátku měření je světlo vypnuto a přibližně 1000 sekund se nechává vzorek ustálit. Odpor vykazuje lehký pokles. Po uplynutí 1043 sekund je zapnuto světlo (oranžová čára). Vlnová délka je nastavena na minimum $\lambda=350\text{nm}$. Charakteristika nevykazuje žádné změny. Od tohoto okamžiku je vlnová délka postupně zvyšována. Patrné změny v odporu se začínají dít při vlnové délce $\lambda=450\text{nm}$ až při $\lambda=540\text{nm}$ (světle zelená barva). Poté se opět odpor zvyšuje na hodnoty, které vykazoval před uvedenými vlnovými délkami. Citlivá oblast je blíže znázorněna na dalším obrázku.

8.2.2 Citlivá oblast vlnových délek pro přímý směr



Obr.8.8 Detail na citlivou oblast vlnových délek v přímém směru pro vzorek 452B, časová závislost



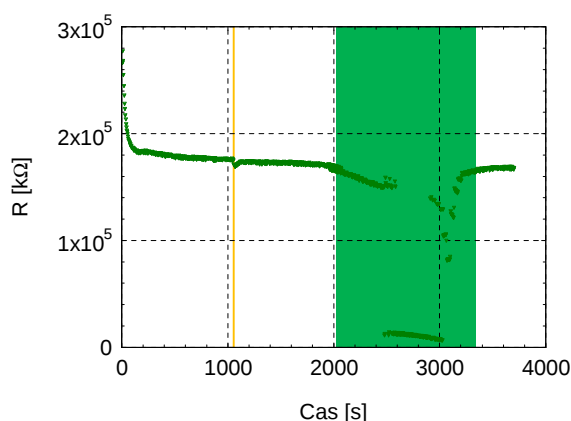
Obr.8.9 Detail na citlivou oblast vlnových délek v přímém směru pro vzorek 452B, rozložení vlnových délek

Velikost odporu je v ustáleném stavu bez osvětlení nebo při osvětlení vlnovou délkou, která neovlivňuje vlastnosti vzorku $131\text{M}\Omega$. Na těchto hodnotách je napětí na prvním napěťovém kontaktu 10.8V a na druhém napěťovém kontaktu 2.8V . Napětí tedy teče od prvního kontaktu (High) ke druhému (Low). Velikost odporu se mění skokově. Monochromátor však nedokáže propustit na vzorek pouze přesně nastavenou vlnovou délku, neboť světelné spektrum prochází přes širokou šěrbinu. Navíc jednotlivé vlnové délky na sebe navazují velice blízko. Z těchto důvodů v začátku oblasti citlivých vlnových délek dochází ke kmitání odporové charakteristiky. Křivka skáče do záporných hodnot odporu (vliv přímého zapojení) a zpět do hodnot odporu jako bez osvětlení. Nikoli však mezi ně. První hodnota změny odporu je zaznamenána při vlnové délce 450nm postupně s krokem 5nm je vlnová délka zvyšována. Na vlnové délce 485nm se hodnota odporu ustálí na spodní hodnotě. Tato hodnota činí $-18\text{M}\Omega$. V tuto chvíli jsou na prvním napěťovém kontaktu (High) 2V a na druhém napěťovém kontaktu 3V . Vzorek je schopen přijmout energii v podobě záření. Přijatá energie při převodu na napětí dokáže mezi měřenými kontakty obrátit směr toku napětí. Naměřené hodnoty vypovídají o napětí 11V , které je přijato z energie světelného záření. Na hodnotách vlnové délky 540nm hodnota odporu ještě více padá do záporných hodnot, velikost přijímaného napětí však zůstává stejná. Vzorkem však začíná protékat vyšší proud $98\mu\text{A}$. Dosavadní hodnota proudu činila $70\mu\text{A}$. První skoková změna odporu do hodnot odpovídajícím vypnutému osvětlení nastává při vlnové délce 550nm . K ustálení velikosti odporu pak dochází při vlnové délce 560nm . Pro vyšší vlnové délky se velikost odporu mezi napěťovými kontakty nemění. Popsaný průběh velikosti odporu při změnách vlnové délky je pro případ přímého zapojení znázorněn obrázkem Obr.8.8.

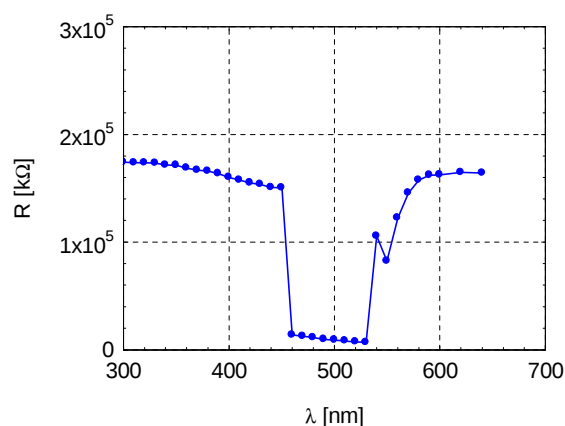
8.3 Zapojení vzorku 452B ve zpětném směru

8.3.1 Hledání vlnové délky

Podobně jako u přímého zapojení byl vzorek nejprve vystaven osvětlení širokého rozsahu vlnových délek, aby se našel interval, ve kterém je vzorek citlivý a mění své vlastnosti. V tomto případě je však vzorek zapojen ve zpětném směru (Obr.8.3). Typ a napájecí napětí zůstalo nezměněno.



Obr.8.10 Hledání citlivé vlnové délky ve zpětném směru pro vzorek 452B, časová závislost

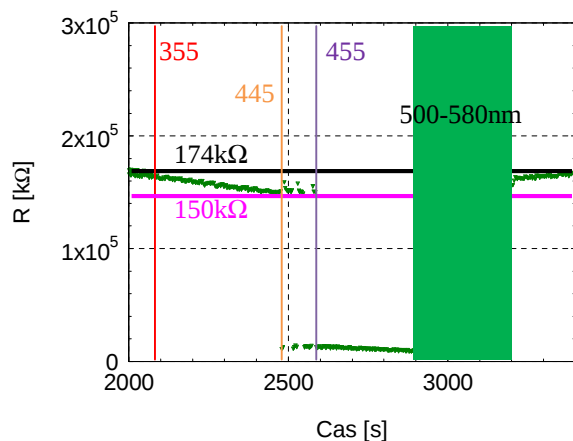


Obr.8.11 Hledání citlivé vlnové délky ve zpětném směru pro vzorek 452B, rozložení vlnových délek

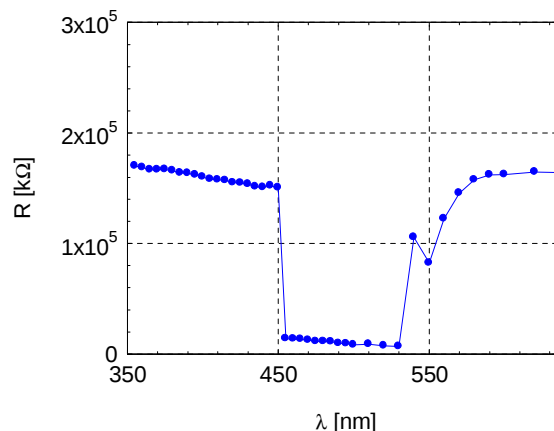
Na začátku měření je osvětlení vypnuto. Opět je vzorek určitý čas (1043s) ponechán v klidu, aby se měřený odpor mezi napětíovými kontakty ustálil (oranžová čára). Poté je zapnuto světlo s nastavenou vlnovou délkou 300nm. Na odporové závislosti se objeví lehký pokles odporu, který se však po přibližně 10 vteřinách vrátí na původní hodnotu. Číselně je původní hodnota $174\text{M}\Omega$. Pokles zaznamenaný při zapnutí světla byl na hodnotu $169\text{M}\Omega$. Odpor se tedy snížil o $5\text{M}\Omega$. Tato hodnota je však díky stále vysoké hodnotě a pouze krátkému okamžiku výskytu pro toto měření nepodstatná.

Vlnová délka je postupně zvyšována a vzorek začne reagovat změnou odporu při $\lambda=355\text{nm}$. V této oblasti začne odpor vzorku lehce klesat. Dále následuje prudký pokles odporu. Ten po určité změně setrvává na nízké hodnotě a poté opět roste. Celou reakci zaznamenává světle zelená barva. Detailní a číselný popis oblasti vlnových délek, na kterou je vzorek citlivý, popisuje následující podkapitola.

8.3.2 Citlivá oblast vlnových délek pro zpětný směr

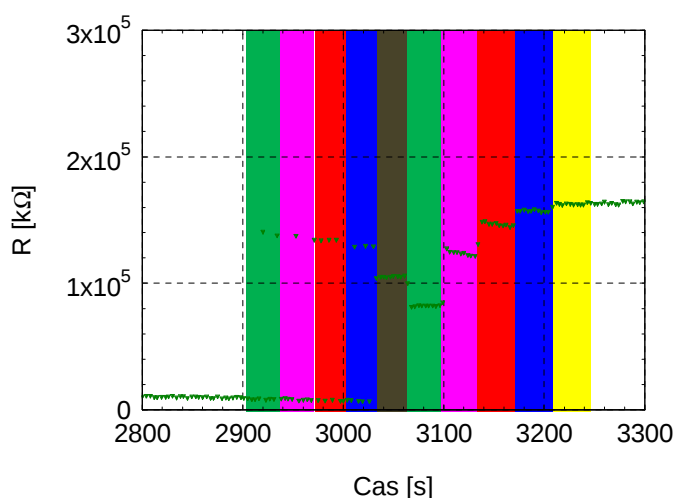


Obr.8.12 Detail na citlivou oblast vlnových délek ve zpětném směru pro vzorek 452B



Obr.8.13 Detail na citlivou oblast vlnových délek ve zpětném směru, rozložení vlnových délek pro vzorek 452B

Odpor se po ustálení, zapnutí osvětlení a nastavování vlnových délek v rozsahu 300-355nm téměř neměnil. Pohyboval se kolem hodnoty $174\text{M}\Omega$, jež znázorňuje podélná černá čára. Při těchto hodnotách je velikost napětí na druhém napět'ovém kontaktu (Low) 11V. Na prvním napět'ovém kontaktu (High) jsou 2V. Úbytek napětí mezi těmito kontakty činí 9V. Příčinou toho, že na kontaktu Low je vyšší napětí než na kontaktu High je směr zapojení. V tomto případě zpětné. Proud vzorkem teče $52\mu\text{A}$. Po překročení vlnové délky 355nm začal odpor zvolna klesat. Tato hranice je znázorněna červenou čarou. Hodnota odporu klesla s narůstající vlnovou délkou na $150\text{M}\Omega$. Nastavená vlnová délka odpovídala hodnotě 445nm (oranžová čára). Pro tento případ je napětí na kontaktu Low stejné. Jelikož se odpor mezi kontakty High a Low lehce snížil, klesl také úbytek napětí. Jeho velikost je nyní přibližně o 200mV nižší $\Rightarrow$ 2.2V na kontaktu High. Protékající proud vzrostl o $1\mu\text{A}$. S další zvyšující se vlnovou délkou ($\lambda > 445\text{nm}$) začíná hodnota odporu skokově padat. Z důvodu popsaném v kapitole pro měření v přímém směru, dochází ke kmitání. Odpor skokově mění svou velikost. K ustálení dochází na vlnové délce 455nm (fialová čára). Ustálená hodnota odporu v tomto případě činí $13\text{M}\Omega$ ale stále klesá, až se dostane přibližně ještě o $1\text{M}\Omega$ níž. Pro tuto oblast je nastavená vlnová délka 500nm. Úbytek napětí mezi kontakty je nyní 0.75V. Pro velikost odporu $12\text{M}\Omega$ je to ještě o několik desetin voltů méně. Následuje interval, kde odpor znovu skokově mění svou hodnotu. Jelikož však nedochází k ustálení odporu (oblast světle zelené barvy), je blíže tato situace znázorněna na následujícím obrázku (Obr.8.14).



Obr.8.14 Detail na citlivou oblast vlnových délek ve zpětném směru pro vzorek 452B

Tento obrázek přibližuje přechod odporu mezi napětovými kontakty s ustálené spodní hranice ($12\text{M}\Omega$) na hodnotu, která odpovídá vypnutému osvětlení nebo takové vlnové délce, která neovlivňuje vlastnosti vzorku. Jak již bylo zmíněno, velikost odporu se ustálila na spodní hranici při rozsahu vlnové délky $455 - 495\text{nm}$. V hodnotě $\lambda=500\text{nm}$ dochází k prvním překmitům hodnot odporu. Jednotlivé barevné pruhy v obrázku (Obr.8.14) reprezentují různou vlnovou délku. Jak se mění jednotlivé parametry vzorku, uvádí následující tabulka.

Znázorňující barva v obrázku Obr.8.14	Vlnová délka $\lambda[\text{nm}]$	Velikost odporu na napětových kontaktech $R[\text{M}\Omega]$	Velikost napětí na kontaktu High $U [\text{V}]$	Velikost napětí na kontaktu Low $U [\text{V}]$	Úbytek napětí mezi kontakty High – Low $U [\text{V}]$
	500	9108	2.58	3.14	0.56
	510	8636	2.59	3.12	0.53
	520	7507	2.67	3.15	0.48
	530	6947	2.73	3.19	0.46
	540	105415	2.93	11.42	8.49
	550	82487	2.49	10.47	7.98
	560	122405	2.14	10.27	8.13
	570	145475	2.15	10.15	8.00
	580	157666	2.07	10.72	8.65
	590	162237	2.08	10.85	8.77

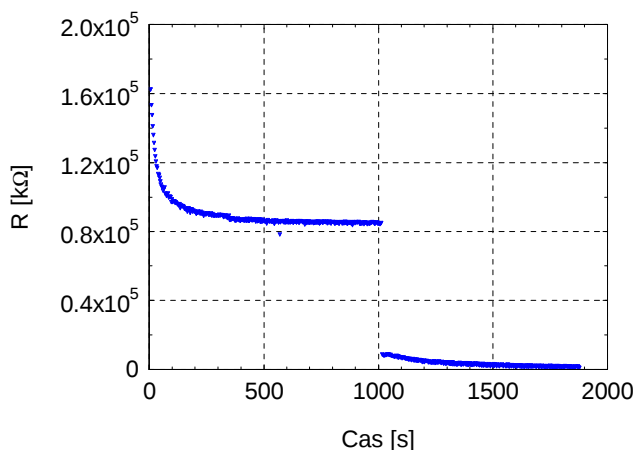
Tab.8.1 Detail na citlivou oblast vlnových délek ve zpětném směru pro vzorek 452B

Při přechodu velikosti odporu mezi napětovými kontakty z nízkých hodnot na vysoké nedochází k jednoznačnému skoku do hodnot jako bez osvětlení. Odpor má tendenci po počátečních překmitích do vyšších hodnot na vlnové délce 500nm opětovně padat. Největší pokles je zaznamenán pro vlnovou délku 550nm . Poté začne plynule stoupat se zvyšující vlnovou délkou až k hodnotám, které odpovídají stavu bez osvětlení. Tato vlastnost je

hlavním rozdílem v zapojení ve zpětném směru oproti směru přímému, kde k takovému jevu nedochází.

8.4 Měření dlouhodobých měření

Tato kapitola se zabývá měřením stejného vzorku (452B), kdy budou nastavené parametry ponechány beze změn po delším časový úsek. Bude tak zkoumána stabilita vzorku. Napájecí napětí je ponecháno (16V). Během měření se nějaký parametr změní a bude sledována reakce vzorku.



Obr.8.15 Reakce na nastavenou vlnovou délku ve zpětném směru

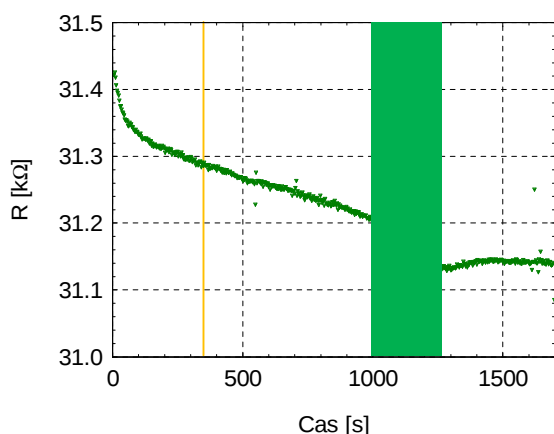
Obrázek (Obr.8.15) zobrazuje závislost odporu mezi napěťovými kontakty. Obvod je zapojen ve zpětném směru. Po spuštění měření je obvod ponechán v klidu beze změn jakýchkoli parametrů. Pokles odporu a asymptotické přibližování hodnotě 80MΩ již bylo pozorováno v předchozích měřeních. Vlastnosti vzorku se nechaly ustálit 1013s. Na kontaktu High bylo naměřeno -11.36V, na kontaktu Low -2.5V. Úbytek mezi kontakty tedy činí 8.86. Poté bylo zapnuto osvětlení s nastavenou konstantní vlnovou délkou 475nm. Odpor vzorku mezi oběma kontakty se skokově snížil na hodnotu 9MΩ. Napětí na kontaktu High vzrostlo na -5V, na kontaktu Low na -3.7. Úbytek mezi kontakty se snížil na 1.3V. Hodnota odporu s narůstajícím časem stále klesala. Měření trvalo přibližně 31 minut. Po této době se ustálila hodnota odporu na 1200kΩ. Napětí bylo -3V na kontaktu High a -2.8V na kontaktu Low. Úbytek mezi kontakty činil pouze 0.2V.

8.5 Zapojení vzorku F35C3 v přímém směru

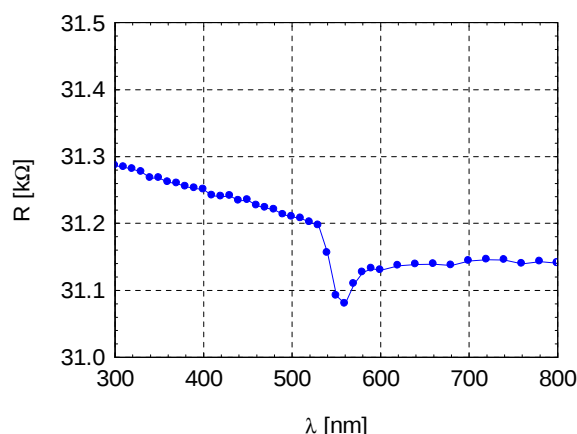
8.5.1 Hledání vlnové délky

Podobně jako u předchozího vzorku bylo několik prvních měření věnováno nalezení oblasti citlivých vlnových délek λ , ve které bude vzorek vykazovat změny vodivosti. Je měřen odpor mezi napěťovými kontakty. Napájecí napětí je rovněž 16V.

Tento vzorek je nízkoohmový. Tato vlastnost předurčuje, že změna vodivosti v oblasti citlivé vlnové délky nebude tak patrná jako u předchozího vzorku.



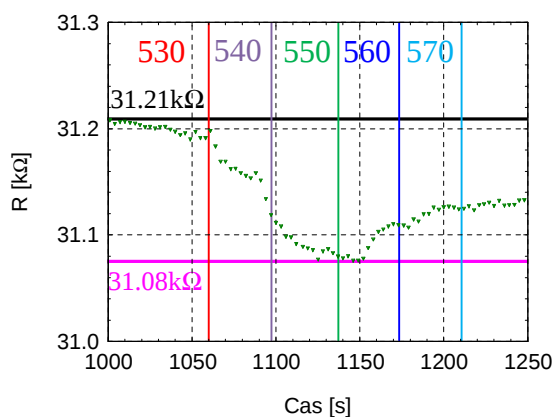
Obr.8.16 Hledání citlivé vlnové délky v přímém směru pro vzorek F35C3, časová závislost



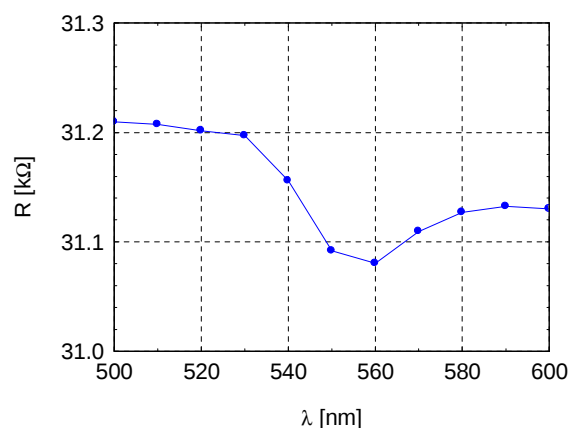
Obr.8.17 Hledání citlivé vlnové délky v přímém směru pro vzorek F35C3, rozložení vlnových délek

Postup je stejný jako u předchozího vzorku. Na začátku měření je světlo vypnuto a přibližně 350 sekund se nechává vzorek ustálit. U tohoto vzorku se nenechává odpor ustalovat příliš dlouho, jelikož má tendenci klesat prudčeji než u vysokoohmových vzorků. Ustuluje se kolem hodnoty 31.5 kΩ. Nechal-li by se odpor ustálit až k této hodnotě, nebyly by poté patrné změny na citlivou vlnovou délku. Po uplynutí zvoleného času je zapnuto světlo (oranžová čára). Vlnová délka je nastavena na minimum $\lambda = 350 \text{ nm}$. Charakteristika nevykazuje žádné změny. Od tohoto okamžiku je vlnová délka postupně zvyšována. Patrné změny v odporu se začínají dít při vlnové délce $\lambda = 530 \text{ nm}$ až při $\lambda = 570 \text{ nm}$ (světle zelená barva). Poté se opět odpor zvyšuje na hodnoty, které vykazoval před uvedenými vlnovými délkami. Citlivá oblast je blíže znázorněna na dalším obrázku.

8.5.2 Citlivá oblast vlnových délek pro přímý směr



Obr.8.18 Detail na citlivou oblast vlnových délek v přímém směru pro vzorek F35C3, časová závislost



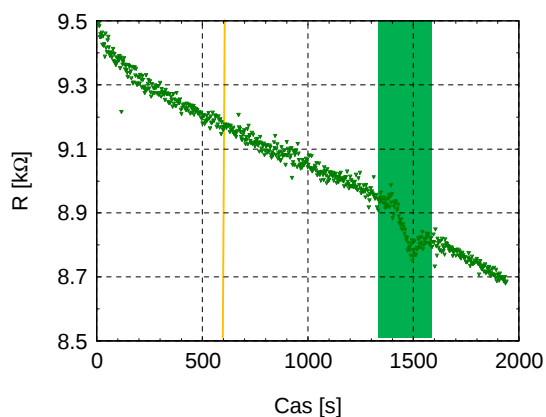
Obr.8.19 Detail na citlivou oblast vlnových délek v přímém směru pro vzorek F35C3, rozložení vlnových délek

Na těchto obrázcích (Obr.8.18 a Obr.8.19) je jasně vidět, že změna velikosti odporu u tohoto vzorku je mnohem menší než u jakéhokoliv vysokoohmového. Srovnáme-li tento vzorek například se vzorkem 452B v zapojení v přímém směru (Obr.8.8 a Obr.8.9) zjistíme,

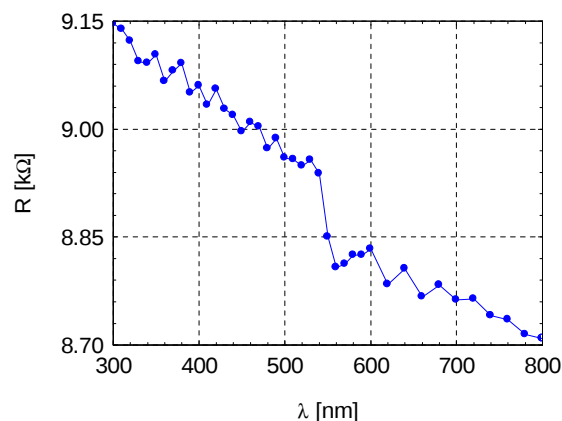
že změna odporu vzorku 452B v intervalu citlivých vlnových délek činí až 95% pokles z původní hodnoty. Zatímco u vzorku F35C3 je rozdíl maxima a minima odporu pouze 1%. Tuto vlastnost zapříčiňuje vodivost vzorků. Protože vzorek 452B patří do vysokoohmových typů, je jeho vodivost nižší. To zapříčiňuje vyšší změnu odporu při osvětlení citlivou vlnovou délkou. Proto u nízkoohmového vzorku F35C3, který má vyšší vodivost, je reakce na osvětlení nižší.

8.6 Zapojení vzorku F33B8 v přímém směru

8.6.1 Hledání vlnové délky

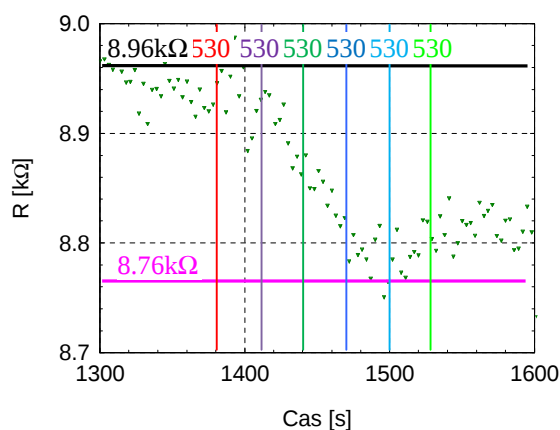


Obr.8.20 Hledání citlivé vlnové délky v přímém směru pro vzorek F33B8, časová závislost

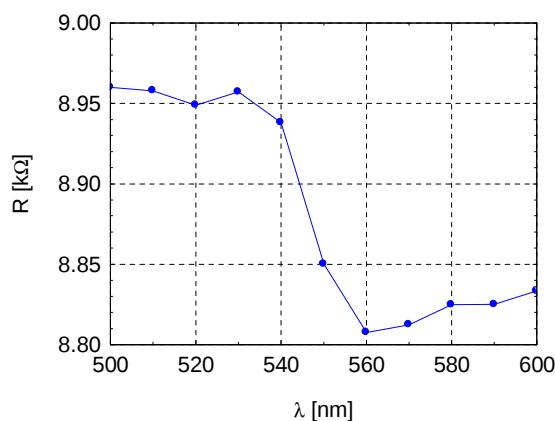


Obr.8.21 Hledání citlivé vlnové délky v přímém směru pro vzorek F33B8, rozložení vlnových délek

Obdobně jako v předchozích měřeních je nejprve prozkoumána oblast vlnových délek a hledána změna vodivosti. Jelikož se jedná o nízkoohmový vzorek, má charakteristika obdobný průběh jako měření vzorku F35C3. Po uplynutí 620s pro ustálení odporu, je zapnuto světlo (oranžová čára). Postupným zvyšováním vlnové délky jsme se dostali až k 530nm, kde začíná odpor prudceji klesat. Změna velikosti odporu oproti ustálenému stavu je vyznačena světlezeleným pruhem. Citlivá oblast je blíže znázorněna na dalším obrázku.



Obr.8.22 Detail na citlivou oblast vlnových délek v přímém směru pro vzorek F33B8, časová závislost



Obr.8.23 Detail na citlivou oblast vlnových délek v přímém směru pro vzorek F33B8, rozložení vlnových délek

Podobně jako u vzorku F35C3 je rozdíl hodnot odporu mnohokrát nižší než u vysokoohmových. V tomto případě se hodnoty liší o 2.5%. U těchto nízkoohmových vzorků sice byl prozkoumán také zpětný směr, charakteristiky jsou však velice podobné směru přímému, včetně získaných hodnot. Proto nebyly tyto výsledky do této práce zařazeny.

Závěr

Předmětem této práce je prezentace CdTe detektoru jako polovodičového materiálu. Dále popsat jeho vlastnosti a porovnat se současnými materiály. Provést měření s proměnnými vstupními veličinami. Prozkoumat vlastnosti kontaktu kov-polovodič.

V první části této práce, kterou činí přibližně čtvrtina, jsou popsány chemické, fyzikální, mechanické a elektrické vlastnosti daného prvku. Jedná se o materiál vzácný. Klíčovou vlastností je měrný odpor materiálu, jehož velikost lze ovlivnit růstem monokrystalu. CdTe se zařadí do světa elektrotechniky zvolna. Nejsou ještě zcela známy všechny jeho vlastnosti a hlavně se pro jeho výrobu musí absolvovat složitý a drahý proces. Již prozkoumané vlastnosti prvku však jej řadí do vhodných materiálů pracujících s optikou.

Ve druhé kapitole je popsána teorie o kontaktech. Jsou uvedeny základní vztahy pro výpočet parametrů kontaktů. Na obrázcích je znázorněn postupný vznik kontaktu mezi kovem a polovodičem. Je zde vysvětleno, jak dochází k úpravě energetických hladin a výstupních prací kovu i polovodiče v zapojení do propustného i závěrného směru.

Abychom mohli lépe pochopit a popsat naměřené průběhy, zabývá se část práce vysvětlením problematiky příměsových hladin, které v určitých časových intervalech ovlivňují vlastnosti materiálu. K tomu slouží proložení naměřené charakteristiky funkcí a hledání časových konstant. Část textu se věnuje vysvětlení působení záření na vliv vodivosti.

K dispozici pro měření jsme měli 3 vzorky s označením 452B, F33B8, F35C3. F33B8 je typu-*p*, ostatní jsou typu-*n*, liší se v ostatních parametrech. Nejvíce měření bylo provedeno na vzorku F33B8. Tento vzorek obsahoval všechny 4 kontakty hned na počátku práce, tudíž se na něm mohla provést řada měření. Ostatní měly pouze kontakty proudové. Teprve přibližně v polovině časového plánu byly také u těchto vzorků přidány napěťové kontakty. U všech vzorků jsme sledovali průběh Volt-Ampérových charakteristik. Měření bylo prováděno několikrát za změny teploty v rozsahu 300K- 400K. Průběhy se vyznačovaly lineárním nebo lehce exponenciálním růstem. Důležitým faktem zaznamenaných, s výjimkou jednoho měření, u všech vzorků bylo růst vodivosti s rostoucí teplotou. Všechny grafy jsou v příslušných kapitolách uvedeny včetně matematických popisů proložených křivek.

Na vzorku F33B8 jsme provedli také dlouhodobá měření, kdy jsme sledovali úbytky napětí na jednotlivých kontaktech. Z naměřených hodnot je poté vynesena závislost odporu v čase mezi jednotlivými kontakty.

Na prvcích 452B a F35C3 byla sledována závislost změny proudu při různých teplotách vzorku (300K - 390K). Proud vzorkem exponenciálně rostl.

Po nakontaktování všech vzorků bylo na nich provedeno také měření závislosti odporu na čase. Závislosti se porovnály a dle prokládacích funkcí byl stanoven počet příměsových hladin a časové oblasti, ovlivňující průběh charakteristik.

Při zhodnocení naměřených výsledků jsme dospěli k závěru, že vzorek F33B8 měl s nejvyšší pravděpodobností poškozené proudové kontakty. Nasvědčovalo tomu měření závislosti úbytku napětí na jednotlivých kontaktech. Při nakontaktování ostatních vzorků byl překontaktován i tento vzorek. Nová měření již byla v pořádku. Ostatní vzorky nevykazovaly žádné závady.

V poslední části práce byly vzorky vystavovány světelnému záření. Nejprve byla hledána u všech vzorků citlivá vlnová délka. V hledaném intervalu vykazovaly vzorky snížení odporu a tudíž vyšší vodivost. Vzorek F35C3 byl vysokoohmový. V tomto měření se tato vlastnost projevila velkým odstupem hodnot mezi oblastí s necitlivou a naopak citlivou vlnovou délkou. Procentuelně činil rozdíl až 95%. Při měření nízkoohmového vzorku nedosahovaly hodnoty odporu v měřených vlnových délkách takových rozdílů. Hodnoty se lišily v rámci několika jednotek procent. Citlivá oblast vlnových délek se pohybovala v intervalu 460nm – 580nm. Napájecí napětí bylo připojeno v obou směrech. Některé vzorky vykazovaly odlišnou citlivost na vlnovou délku v různém směru připojeného napájecího napětí.

Komentář k zadání diplomové práce

Prvním cílem, kterého mělo být v této práci dosaženo, bylo prostudovat základní vlastnosti detektorů záření na bázi CdTe. Veškeré vlastnosti daného materiálu včetně jednotlivých prvků popisuje celá první kapitola.

Druhým úkolem bylo prostudovat základní typy kontaktů a vznik kontaktu mezi kovem a polovodičem. Touto problematikou se zabývá druhá kapitola, kde je pomocí několika obrázků znázorněna reakce materiálů při vzniku kontaktu.

Ve třetí části zadání měla být měřena závislost transportu nosičů na teplotě. Tato problematika byla zkoumána pomocí měřených Volt-Ampérových charakteristik při měnění teploty vzorku. Tato část je zpracována čtvrtou kapitolou.

Posledním cílem bylo sledovat změny vodivosti vzorku na vlnové délce. Vzorky byly vystaveny širokému spektru záření a poté byla citlivá oblast zkoumána blíže. U vybraných vzorků byla sledována tato závislost v obou směrech připojeného napětí. Informace spojené s tímto zkoumáním jsou obsahem osmé kapitoly.

Tímto jsem přesvědčen o tom, že bylo splněno zadání diplomové práce a to ve všech jeho bodech.

Použitá literatura

- [1] BRZOBOHATÝ, J., MUSIL, V., BAJER, A., BOUŠEK, J., PROKOP, R., *Elektronické součástky*, učební texty, VUT FEKT Brno 2003
- [2] ZAJAČEK, J., *Transport and Noise Characteristics of CdTe Sensors*, Brno 2006, ISBN: 80-214-2990-9
- [3] ANDREEV, A., *Investigation of 1/f Noise of p-type CdTe Detectors*, Cluj-Napoc, 2007, ISBN: 978-973-713-174-4
- [4] ZAJAČEK, J., *Metal-Semiconductor Contact Modeling and Transport Characteristics Detectors of Radiation Based on the CdTe*, Austria 2006, ISBN: 3-902463-05-8
- [5] LIBOR, V., *Příprava a vlastnosti kontaktů na polovodičích typu CdTe/CdZnTe*, Diplomová práce, UK Praha 2005
- [6] TURKEVYCH, I., *High-temperature electron and hole mobility in CdTe*, UK Praha 2002
- [7] *Vlastnosti Cadmium Telluride (CdTe)*, dostupné na WWW: http://www.sttic.com.ru/lpcbc/DANDP/cdte_adv.html
- [8] NAVAL RESEARCH LABORATORY, *The CdTe Structure*, Last Modified 2004, dostupné na WWW: <http://cst-www.nrl.navy.mil/lattice/struk/CdTe.html>
- [9] ZANIO, K., *Semiconductors and Semimetals, Volume 13, Cadmium Telluride*, USA 1978, ISBN: 0-12-752113-5
- [10] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., *Fyzika, Elektromagnetické vlny – Optika – Relativita*, Brno 2000, ISBN: 80-214-1869-9
- [11] VACKOVÁ, S., HORADŽOVSKÝ, T., MAJLINGOVÁ, O., *Influence of Temperature Gradient on the Function of CdTe gamma Detectors*, Proceedings of Workshop 2003. Praha: CTU, 2003, vol. A, s. 128-129. ISBN 80-01-02708-2.
- [12] UDA, H., IKEGAMI, S., SONOMURA, H., *Te-metal contact on evaporated CdTe film for a CdS/CdTe solar cell*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol 35., USA 1994, ISBN: ISSN 0927-0248
- [13] CORDES, J., SCHMID-FETZER, R., *Electrical properties and contact metallurgy of elemental (Cu, Ag, Au, Ni) and compound contacts*, Semiconductor Science and Technology Vol.10, Francie 1995, ISBN: 10-1088-0268
- [14] HENISCH, H., K., *Semiconductors contacts*, Calderon Press, Oxford 1984, ISBN: 3-908450-94-2
- [15] WIKIPEDIE, *Otevřená encyklopedie*, konkrétní odkazy dostupné na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kadmium> a <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tellur>