



**FAKULTA  
APLIKOVANÝCH VĚD  
ZÁPADOČESKÉ  
UNIVERZITY  
V PLZNI**

# **Vliv geometrie vzorku na přesnost měření elektrických vlastností tenkovrstvých transparentních vodivých oxidů**

**Jan Koloros**

**Vedoucí bakalářské práce:** Ing. Tomáš Kozák, Ph.D.

Plzeň, 2021

## **Čestné Prohlášení**

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a zdrojů, jejichž úplný seznam je její součástí v závěru práce.

V Plzni dne 28.5.2021

.....

Jan Koloros

## **Poděkování**

Rád bych zde vyjádřil své poděkování lidem, kteří mě podporovali při psaní mé bakalářské práce. Především bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Tomášovi Kozákovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a užitečné rady při psaní bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Rezkovi, Ph.D. za depozici vzorků použitých při měření a za poskytnutí studijních materiálů.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce je zaměřena na zkoumání vlivu geometrie vzorku na naměřené hodnoty rezistivity a koncentrace nosičů náboje u tenkých vrstev transparentních vodivých oxidů. Rozdílné geometrie jsou zkoumány na dvou transparentních vodivých oxidech (oxid zinečnatý dopovaný hliníkem, AZO), jenž byly připravovány za různých podmínek depozice. K měření jejich elektrických vlastností byly použity van der Pauwova metoda a čtyřbodová metoda. Čtvercové vzorky byly upraveny pomocí diamantové tužky s cílem připravit geometrii nazývanou řecký kříž a disk. Měřením jsme zjistili, že nejlepší preciznosti hodnot koncentrace nosičů náboje námi měřených geometrií dosahuje u van der Pauwovy metody ideální čtvercový rozměr 8,5 x 8,5 mm, který má velkou délku vrypu, ale vryp ještě nenarušuje strukturu transparentní vodivé vrstvy ve středu vzorku. Z výsledků při měření van der Pauwovy metody také vidíme, že se zvětšující se délkou vrypu se zvětšuje naměřená hodnota pro rezistivitu. Hodnoty rezistivity získané oběma metodami se shodují.

**Klíčová slova:** AZO, Hallův jev, čtyřbodová metoda, transparentní vodivé oxidy,  
van der Pauwova metoda

## **Abstract**

This bachelor's thesis is focused on the investigation of the influence of the sample geometry on the measured values of resistivity and concentration of charge carriers in thin layers of transparent conductive oxides. Different geometries are investigated on two transparent conductive oxides (aluminium-doped zinc oxide, AZO), which were prepared under different deposition conditions. The van der Pauw method and the four-point method were used to measure their electrical properties. The square samples were treated with a diamond pencil to prepare a geometry called a Greek cross and a disk. By experimental measurements, we found that the best precision values of the concentration of charge carriers from the geometries measured by us were obtained by the van der Pauw method using a square sample with dimensions of 8.5 x 8.5 mm, which has a large scratch length, but the scratch does not disturb the structure of the transparent conductive layer in the center of the sample. From the results of the measurement of the van der Pauw method, we also see that as the length of the scratch increases, the measured value for resistivity increases. The resistivity values obtained by both methods are the same.

**Key words:** AZO, Hall effect, four point probe method, transparent conducting layers, van der Pauw method

# Obsah

1. Úvod .....	- 6 -
2. Současný stav řešené problematiky .....	- 7 -
2.1. Transparentní vodivé oxidy .....	- 7 -
2.2. Elektrická vodivost pevných látek .....	- 8 -
2.3. Hallův jev.....	- 9 -
3. Cíle bakalářské práce.....	- 11 -
4. Příprava vzorků a postup měření .....	- 12 -
4.1. Měření elektrické vodivosti čtyřbodovou metodou.....	- 12 -
4.2. Měření elektrické vodivosti a koncentrace nosičů náboje pomocí van der Pauwovy metody .....	- 13 -
4.3. Příprava vzorků .....	- 15 -
4.4. Postup měření elektrických vlastností.....	- 17 -
5. Výsledky měření .....	- 19 -
5.1. Vliv velikosti proudu na naměřené hodnoty rezistivity a koncentrace .	- 19 -
5.2. Rozdíly mezi tvary vzorku 50 .....	- 22 -
5.3. Porovnání van der Pauwovy a čtyřbodové metody .....	- 24 -
5.4. Úprava geometrie pro zlepšení přesnosti měření van der Pauwovou metodou .....	- 25 -
6. Závěr .....	- 30 -
7. Použité zdroje.....	- 31 -

# 1. Úvod

V současné době, kdy dochází k rychlému rozvoji elektrotechniky je potřeba dosahovat stále lepších vlastností různých materiálů. Někdy ale může nastat problém. Prvky, které jsou vhodné a používané ve sloučeninách, začínají být nedostupné a už nestačí pokrýt poptávku. Z tohoto důvodu se musí hledat jiné lépe dostupné prvky, jenž ve sloučeninách dosahují podobných nebo lepších vlastností. Když se takový prvek najde, musí se vymyslet, za jakých podmínek přípravy a v jakém složení dosahuje nejlepších požadovaných vlastností ve sloučeninách. Využívané indium (u transparentních vodivých oxidů ITO) je vzácné, a proto je snaha ho nahradit jiným levnějším transparentním vodivým oxidem, například AZO, což je oxid zinečnatý dopovaný hliníkem.

Tato bakalářská práce zkoumá, jaký vliv mají na měřené elektrické vlastnosti vzorku různé druhy geometrie vzorku v důsledku různých rozměrů nebo kvůli vrypům do vzorku. Zkoumání těchto vlastností probíhá na vzorku transparentního vodivého oxidu AZO.

Struktura vypracované práce je členěna do sedmi hlavních částí, kde v první části je krátký úvod. V druhé části jsou představeny hlavně elektrické vlastnosti transparentních vodivých oxidů a také různé druhy transparentních vodivých oxidů. Třetí část vyjmenovává cíle bakalářské práce. V následné čtvrté části je popsána samotná příprava vzorků a úprava jejich geometrie pomocí vrypů diamantovou tužkou. Také je zde popsán princip praktické realizace měření pomocí van der Pauwovy metody a čtyřbodové metody. Pátá část, kde dochází k prezentaci a vyhodnocení výsledků, je, co se týče celého obsahu bakalářské práce, nejvíce zajímavá. V této části jsou diskutovány výsledky měření zkoumající konkrétněji vliv velikosti a nepravidelnosti vzorku a vliv specifické úpravy geometrie vzorku, kde hlavní inspiraci představuje tvar nazývaný řecký kříž, který by měl být pro měření koncentrace nosičů náboje přesnější než standardně používaná čtvercová geometrie [1]. Výsledky ukazují do jaké míry poškození nebo geometrie vzorku ovlivňuje naměřené hodnoty elektrických vlastností transparentních vodivých oxidů, a to jak bud pozitivně tak i negativně. V závěru, kde dochází ke spojení předpokládaných teoretických znalostí společně s naměřenými výsledky, jsou shrnuty předchozí dosažené důležité informace. Cílem bakalářské práce je dokázat, zda nepravidelnost tvaru vzorku ovlivňuje naměřené hodnoty, a ověřit, zda doporučovaná složitější geometrie typu řeckého kříže a disku umožňuje získat přesnější hodnoty koncentrace nosičů náboje.

## 2. Současný stav řešené problematiky

V této části jsou představeny základní fyzikální veličiny a vztahy, které mohou pomoci objasnit problematiku elektrických vlastností u tenkých transparentních vodivých oxidů a jejich měření. Také zde jsou vyjmenovány různé objevené druhy transparentních vodivých oxidů.

### 2.1. Transparentní vodivé oxidy

Jsou to materiály na bázi oxidů připravených ve formě tenké vrstvy, která je dostatečně průhledná, ale přitom vykazuje vysokou elektrickou vodivost. Přesněji řečeno tenké vrstvy transparentních vodivých oxidů jsou opticky průhledné (transparentní) v oblasti viditelného světla (390-790 nm) a velikost jejich vodivosti je větší než  $10^3 \frac{S}{cm}$ , kde S je jednotka elektrické vodivosti nazývaná siemens [2]. První zpráva o elektricky vodivé a průhledné vrstvě sloučeniny oxidu kadmnatého pochází z roku 1907, kdy začíná vzrůstat zájem o optoelektrické jevy. Existuje velké množství transparentních vodivých oxidů, patří k nim například oxid cíničitý dopovaný indiem (zkráceně ITO), oxid cíničitý dopovaný fluorem (se zkratkou FTO), oxid cíničitý dopovaný antimonem (zkráceně ATO), oxid zinečnatý dopovaný hliníkem (AZO), oxid zinečnatý dopovaný galliem (GZO), či kombinace dvou předchozích materiálů (AGZO). [3,2]

Tato bakalářská práce je zaměřená na zkoumání geometrie tenkých vrstev oxidu zinečnatého, který je dopovaný hliníkem (AZO). V současné době je jejich výzkum a následné využití v optoelektrických součástkách na vzestupu. Hlavní příčinou jsou menší finanční náklady a dostupnost oproti doposud využívaným vrstvám na bázi oxidu india a cínu (ITO). Oproti využívaným tenkým vrstvám ITO navíc tenké vrstvy AZO vykazují menší rozptyl indexu lomu na vlnové délce ve viditelné oblasti světelného spektra [4]. Jejich nevýhodou však představuje menší chemická odolnost proti kyselinám. Při výrobě LCD elektroniky se využívá leptání kyselinou, které dokáže u ITO vrstev vyleptat vrstvu požadovaných rozměrů, a to bohužel kvůli velké citlivosti na kyseliny u vrstev AZO není možné. Další nevýhoda vrstev AZO je jejich rychlejší degradace optických, elektrických a strukturálních vlastností vlivem vlhkého a teplého vzduchu než u vrstev ITO. První teplotně stabilní tenká vrstva AZO byla objevena v roce 1983. [2,5,6]



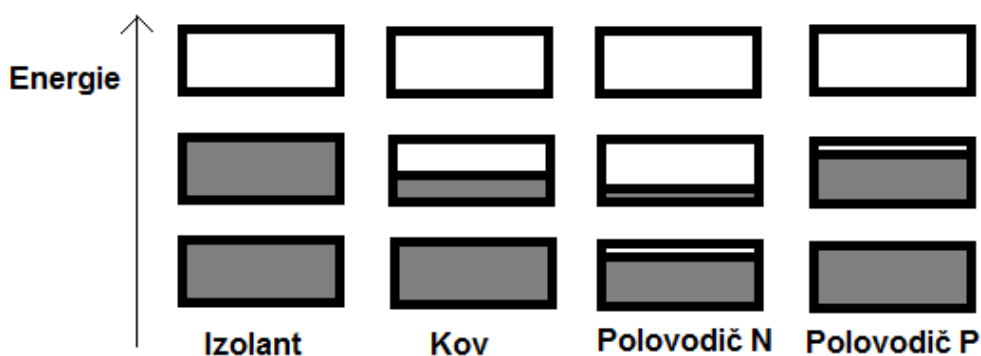
## 2.2. Elektrická vodivost pevných látek

Průchod elektrického proudu nastává až v momentě, kdy přiložené vnější elektrické pole vyvolá pohyb elektronů jedním směrem. Každá pevná látka obsahuje velký počet elektronů, které se neuspořádaně pohybují velkou rychlostí okolo jader atomů. V pevné látce vlivem vzájemného působení velkého množství atomů jsou energetické hladiny elektronů uspořádány do pásové struktury. Jednotlivé pásy dovolených energií jsou od sebe odděleny tzv. zakázanými pásy (viz Obr. 2.1). [7,8]



**Obr. 2.1** Schéma energetických pásové struktury v pevné látce [7]

Poslední zcela obsazený pás směrem od jádra atomu se nazývá valenční pás. Nad ním se nachází tzv. vodivostní pás, který je důležitý z hlediska elektrické vodivosti látky. Vzdálenost valenčního a vodivostního pásu se pohybuje typicky v řádu několika elektronvoltů. Podle obsazenosti vodivostního pásu se pevná látka chová jako izolant, vodič nebo polovodič. Na Obr. 2.2 je schematicky znázorněna obsazenost jednotlivých vodivostních pásové struktury a příslušný druh vodivosti. Jako kov se chová pevná látka, která má vodivostní pás obsazený mezi 10 a 90 %. [7,8]



**Obr. 2.2** Schéma zaplnění energetických pásové struktury pro izolant, kov a polovodič

S obsazením energetických pásů souvisí také velikost měrného elektrického odporu látek (rezistivity). Kovy mají typicky nejmenší měrný elektrický odpor, a to mezi hodnotami  $\rho = 10^{-8} - 10^{-6} \Omega m$ . Polovodiče mají měrný elektrický odpor mezi hodnotami  $\rho = 10^{-6} - 10^8 \Omega m$ . Pro izolanty je hodnota měrného elektrického odporu větší než  $10^8 \Omega m$ . Při zvyšující se teplotě u kovů roste měrný elektrický odpor, u polovodičů je to opačně (se zvyšující teplotou klesá měrný elektrický odpor). [9]

Elektrický proud vzniká v důsledku pohybu volných nosičů náboje, a to díky působení elektrického pole. V pevných látkách lze elektrický proud vyjádřit pomocí proudové hustoty

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \quad (2.1)$$

kde  $\mathbf{E}$  je intenzita elektrického pole a  $\sigma$  je elektrická vodivost daná vztahem

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = e\mu n \quad (2.2)$$

přičemž  $\rho$  je měrný odpor,  $e$  je elementární náboj,  $\mu$  je pohyblivost nosičů náboje a  $n$  je jejich koncentrace. Toto platí za předpokladu, že jeden z nosičů náboje je dominantní. U kovů jsou jako nosiče náboje elektrického proudu využívány volné elektrony ve vodivostním pásu. Pro polovodiče, kde máme dva typy P a N, dochází k vedení elektrického proudu pomocí elektronů nebo děr. Dominantními nosiči náboje pro polovodič typu P jsou díry (elektronově neobsazené stavy) a u polovodičů typu N jsou dominantními nosiči náboje elektrony. [10]

## 2.3. Hallův jev

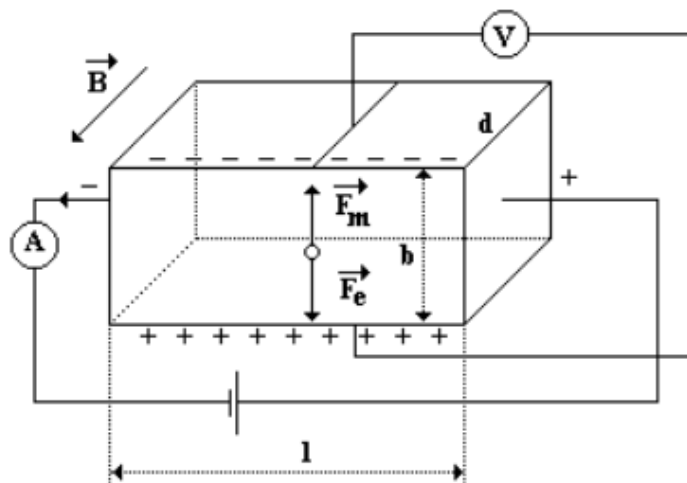
Pokud látkou umístěnou v magnetickém poli prochází elektrický proud, můžeme kolmo na směr proudu a směr magnetického pole naměřit napětí. Tento jev se nazývá Hallův jev a je důsledkem Lorentzovy síly, která působí na nosiče náboje v magnetickém poli a vychyluje je kolmo na jejich směr pohybu. Princip Hallova jevu je znázorněn na Obr. 2.3 V rovnovážném stavu musí mít elektrická síla  $\mathbf{F}_e$  a magnetická síla  $\mathbf{F}_m$  působící na nosiče náboje stejnou velikost, tedy platí vztah  $\mathbf{F}_e = \mathbf{F}_m$ . Z tohoto vztahu po dosazení dostaneme rovnici

$$Q \cdot \mathbf{E} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{I} \cdot l \quad (2.3)$$

kde  $Q$  je celkový náboj volných elektronů,  $\mathbf{E}$  je elektrická intenzita,  $\mathbf{B}$  je velikost magnetické indukce,  $\mathbf{I}$  je procházející proud a  $l$  je délka destičky. Pro velikost elektrické intenzity platí vztah

$$E = \frac{U_H}{b} \quad (2.4)$$

kde  $U_H$  je Hallovo napětí a  $b$  je tloušťka vzorku. [11,7]



**Obr. 2.3** Znáznornění principu Hallova jevu [7]

Když dosadíme (2.1) do (2.3) za předpokladu, že celkový náboj volných nosičů náboje (elektronů)  $Q = e \cdot n \cdot b \cdot d \cdot l$ , pak dostaneme vztah pro Hallovo napětí

$$U_H = \frac{B \cdot I}{e \cdot n \cdot d} \quad (2.5)$$

kde  $d$  je rozměr vzorku z Obr. 2.3,  $e$  je elementární náboj a  $n$  je koncentrace elektronů. Při měření elektrických vlastností tenkých vrstev lze měřením odporu vzorku při vhodné konfiguraci elektrod a s využitím (2.1) a (2.2) z kapitoly 2.2 zjistit všechny níže uvedené veličiny. Pro rezistivitu tenkých vrstev platí

$$\rho = R_s \cdot b \quad (2.6)$$

kde  $R_s$  je plošný odpor a  $b$  je tloušťka vrstvy, koncentrace elektronů  $n$  je daná ze vztahu

$$n = \frac{\Delta B}{e \cdot \Delta R \cdot b} \quad (2.7)$$

kde  $e$  je elementární náboj a  $\Delta R$  je změna odporu ve směru kolmém k procházejícímu proudu a směru magnetického pole při změně magnetického indukce o  $\Delta B$  a pohyblivost elektronů

$$\mu = \frac{1}{e \cdot n_s \cdot R_s} \quad (2.8)$$

kde  $n_s = n \cdot b$ . Pro Hallův jev je specifický Hallův parametr  $R_h$ , který určuje typ polovodiče. Tento parametr se vypočte

$$R_h = \frac{1}{e \cdot n} \quad (2.9)$$

Pokud vyjde kladný, jedná se o materiál, kde převažují takzvané "díry", jedná se o P-polovodič. Pokud je záporný, jedná se o N-polovodič a elektrony převyšují počet děr. [10,7]

### **3. Cíle bakalářské práce**

1. Seznámit se s teorií elektrické vodivosti pevných látek se zaměřením na transparentní vodivé oxidy. Dále se seznámit s principy měření elektrické vodivosti a koncentrace nosičů náboje (Hallův jev) u tenkých vrstev pomocí čtyřbodové metody.
2. Prozkoumat vliv geometrie měřeného vzorku na přesnost měření elektrické vodivosti a koncentrace nosičů náboje. Diskutovat teoretické předpoklady a ověřit je měřením.

## 4. Příprava vzorků a postup měření

V této části je popsáno, za jakých podmínek byly připraveny měřené vzorky a jak probíhalo jejich následné měření. Celkem byly pro tuto práci vybrány dva různé vzorky transparentních vodivých oxidů AZO připravené za odlišných podmínek. Konkrétně se jedná o vzorek s označením AZO151-34 (dále jen „vzorek 34“) a vzorek s označením AZO151-50 (dále jen „vzorek 50“). Tyto vzorky byly nanášeny na standardní laboratorní podložní skličko o velikosti 26x76mm. Z takto připravených vzorků byly následně nalámány menší vzorky vhodné pro měření elektrických vlastností pomocí van der Pauwovy metody. Jednotlivé části byly označeny latinskými písmeny.

### 4.1. Měření elektrické vodivosti čtyřbodovou metodou

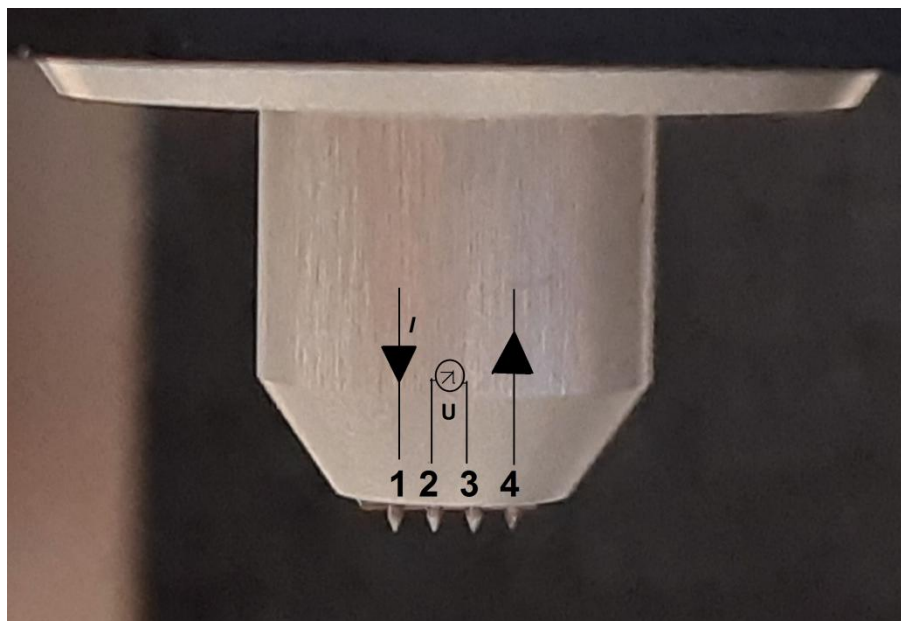
Čtyřbodová metoda se používá pro měření rezistivity vodivých a polovodivých materiálů. Této skutečnosti využijeme, abychom ověřili vypočtené hodnoty získané při měření van der Pauwovou metodou. Oproti jiným metodám kromě tloušťky nanášené vodivé vrstvy nemusíme znát žádné jiné vlastnosti nanášené vodivé vrstvy ani přesné rozměry vzorku, pokud jsou výrazně větší než vzdálenost měřících hrotů. Jak už název napovídá, tak hlavní funkci při měření mají čtyři stejně od sebe vzdálené hroty. Měření elektrické vodivosti vzorku se provádí tak, že se všechny čtyři hroty dotýkají plochy vzorku. Obr. 4.1 znázorňuje princip čtyřbodové metody. Proud  $I$  přivádíme na bod 1 a odchází bodem 4, napětí  $U$  měříme mezi body 2 a 3. Protože připojený voltmetr má velký vnitřní odpor, nedochází k úbytku napětí na kontaktech mezi hroty a vzorkem. Mezi jednotlivými body je konstantní vzdálenost  $s$ . Tloušťku destičky označíme písmenkem  $b$ . Odpor  $R$  lze spočítat podle Ohmova zákona:  $R = \frac{U}{I}$ . Rezistivita  $\rho$  je dána vztahem

$$\rho = R \cdot b \cdot F \cdot C \cdot K_s \cdot K_t \quad (4.1)$$

kde  $F$  je korekce na tloušťku  $b$ ,  $C$  je korekce na plošný rozměr destičky,  $K_s$  je korekce geometrických rozměrů hlavice,  $K_t$  je korekce na teplotu místnosti. Při výpočtech předpokládáme, že jediná veličina, která se bude měnit, je elektrický odpor. Ostatní veličiny jsou konstantní, proto je můžeme vyjádřit jako jednu konstantu  $K$ . Rezistivitu  $\rho$  vypočteme zjednodušeným vztahem

$$\rho = R \cdot K \quad (4.2)$$

kde  $R$  je vypočteno z naměřeného napětí a proudu a  $K$  získáme rovněž přímo z měřícího softwaru po zadání rozměrů vzorku. [12]



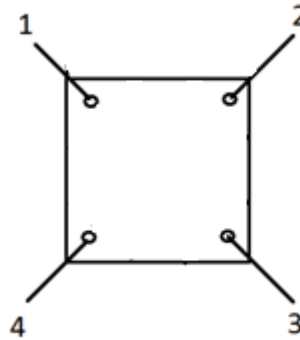
**Obr. 4.1** Znárodnění měření pomocí hrotů u čtyřbodové metody

## **4.2. Měření elektrické vodivosti a koncentrace nosičů náboje pomocí van der Pauwovy metody**

Používaná měřící aparatura pro měření Hallova jevu je složena z pěti částí – ovladače pro měření van der Pauwovy metody, vakuové komory se čtyřmi hroty, elektromagnetu (Model 5403), dvou výkonných zdrojů proudu a chladiče elektromagnetů (cívek). V případech, kdy se měří v závislosti na teplotě nebo při nízkém tlaku, zapojení se rozšiřuje o další dvě části – teplotní ovladač a vakuovou pumpu. [13]

Nejprve se vloží měřený vzorek do vakuové komory na podložku tak, aby se každý ze čtyř hrotů dotýkal povrchu vzorku v jednom rohu, viz Obr. 4.2 Protože u van der Pauwovy metody se využívá ke zjištění koncentrace nosičů náboje magnetické pole, vzorek je následně zasunut mezi dvě jádra elektromagnetu. Před samotným měřením je vhodné pomocí dvoubodové metody proměřit lineární závislost napětí na procházejícím proudu (kvůli ověření dobrých kontaktů na jednotlivých místech dotyku). V dalším kroku s využitím všech čtyř hrotů (čtyřbodově) došlo nejprve k vedení proudu procházejícím mezi sousedními rohy a k měření napětí v protilehlých rozích. Pak následovalo za působení magnetického pole k vedení elektrického proudu přes střed vzorku (úhlopříčně) a k zaznamenání hodnot napětí, které se měří v kolmém směru na elektrický proud (v navzájem sobě protilehlých rozích).

Na Obr. 4.2 je znázorněno, kde se jednotlivé hroty dotýkají. Měření probíhá tak, že se proud přivede na bod 1 a odvádí bodem 2, napětí se měří mezi body 3 a 4. Tímto způsobem se měří i napětí mezi dalšími body. Celkem tedy probíhají čtyři měření, přičemž měření mezi opačnými hranami jsou ekvivalentní.



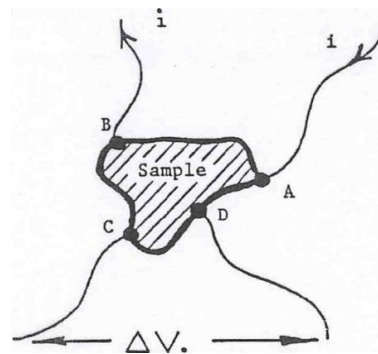
**Obr. 4.2** Znázornění pozice kontaktu měřících hrotů se vzorkem u van der Pauwovy metody

Obr. 4.3 znázorňuje obecně tzv. van der Pauwovu metodu pro měření vodivosti i nepravidelného vzorku. Tato metoda předpokládá čtyři podmínky:

- kontakty se dotýkají vzorku na jeho okrajích
- vzorek má homogenní tloušťku měřené vrstvy
- vzorek nemá izolované otvory
- kontakty jsou dostatečně malé

Proud  $I$  je přiváděn na bod A a odchází v bodě B, zatímco mezi body C a D měříme napětí. Takto naměřený odpor, který označíme  $R_a$ , se vypočte podle Ohmova zákona:  $R_a = \frac{V_a - V_c}{I}$ . Odpor  $R_b$  naměřený tak, že proud prochází mezi body B a C a napětí měříme mezi body A a D, se vypočte podle vztahu:  $R_b = \frac{V_a - V_d}{I}$ . Plošný odpor  $R_s$  se vypočte z nelineární rovnice

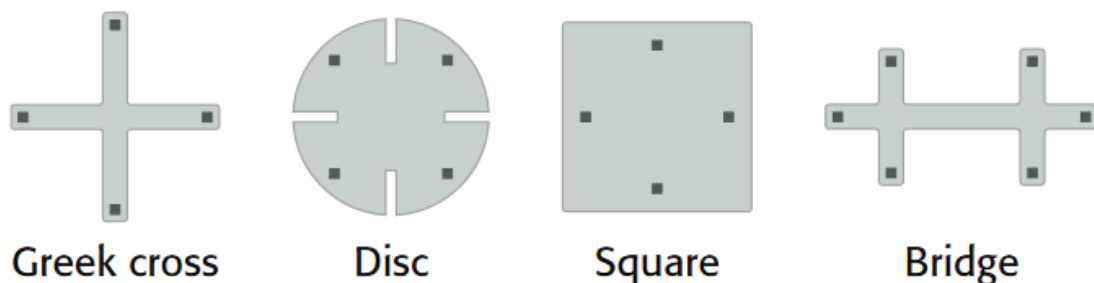
$$e^{-\frac{\pi R_a}{R_s}} + e^{-\frac{\pi R_b}{R_s}} = 1 \quad (4.3)$$



**Obr. 4.3** Van der Pauwova konfigurace pro měření elektrické vodivosti tenkých vrstev [14]

Pro rezistivitu tenké vrstvy pak platí vztah  $\rho = R_s \cdot b$ , viz 2.6, kde  $b$  je tloušťka vrstvy a pro koncentraci nosičů náboje  $n = \frac{\Delta B}{e \cdot \Delta R \cdot d}$ , viz 2.7, kde  $\Delta B = B_+ - B_-$  je změna velikosti magnetické indukce,  $e$  je elementární náboj elektronu a  $\Delta R = R_{DB+} - R_{DB-}$  je změna odporu ve směru kolmém k průběhu proudu a směru magnetického pole při změně magnetického pole o  $\Delta B$  a pohyblivost  $\mu = \frac{1}{e \cdot n_s \cdot R_s}$ , viz 2.8, kde  $n_s = n \cdot b$ . [14]

Obr. 4.4 zobrazuje různé konfigurace používané při měření. Na katedře fyziky Fakulty aplikovaných věd se připravují vzorky ve tvaru čtverce, protože měřící hroty u použité měřící aparatury jsou uspořádány do čtverce a také z důvodu jejich jednodušší přípravy čtvercového vzorku oproti tvarům, jako je řecký kříž, disk nebo most. Avšak přesnější výsledky měření teoreticky poskytuje geometrie nazývaná řecký kříž, která má minimální možnou plochu k průchodu elektrického proudu a lze tak očekávat větší hodnotu měřeného napětí pro stejnou hodnotu procházejícího proudu. Lze předpokládat, že pomocí vrypů diamantovou tužkou do tenké vrstvy dojde k přerušení této vodivé vrstvy. Tímto způsobem lze dosáhnout zmenšení plochy, kterou prochází elektrický proud, a lze docílit přesnějšího měření rezistivity a koncentrace nosičů náboje než bez vrypu. Tímto způsobem relativně jednoduše vytvoříme geometrii, která je kombinací řeckého kříže a disku. Takto upravený vzorek by měl umožňovat omezení chyb měření, jenž jsou způsobeny umístěním kontaktů nebo velikostí vzorku. [1,15]



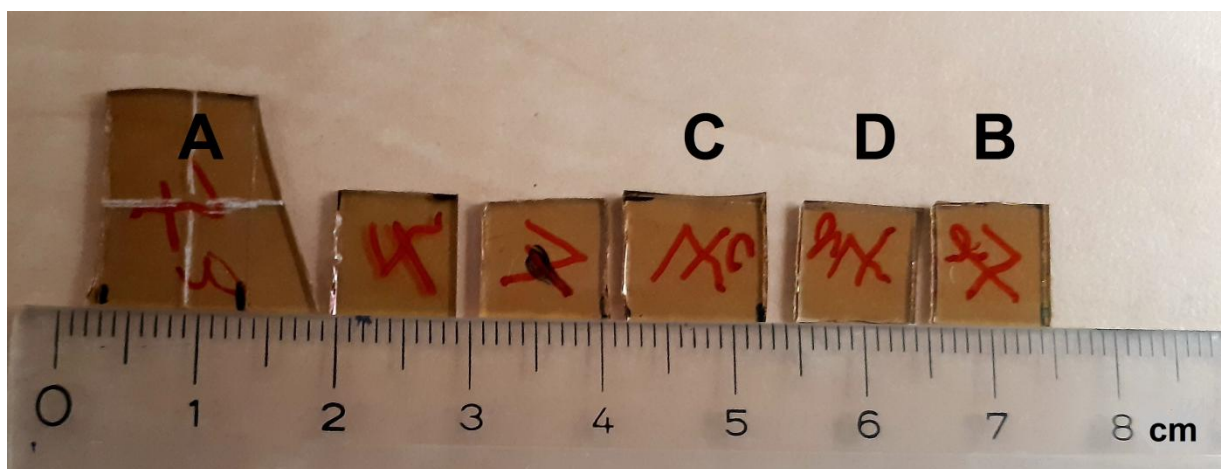
Obr. 4.4 Různé geometrie vzorků (řecký kříž, disk, čtverec, most) [1]

### 4.3. Příprava vzorků

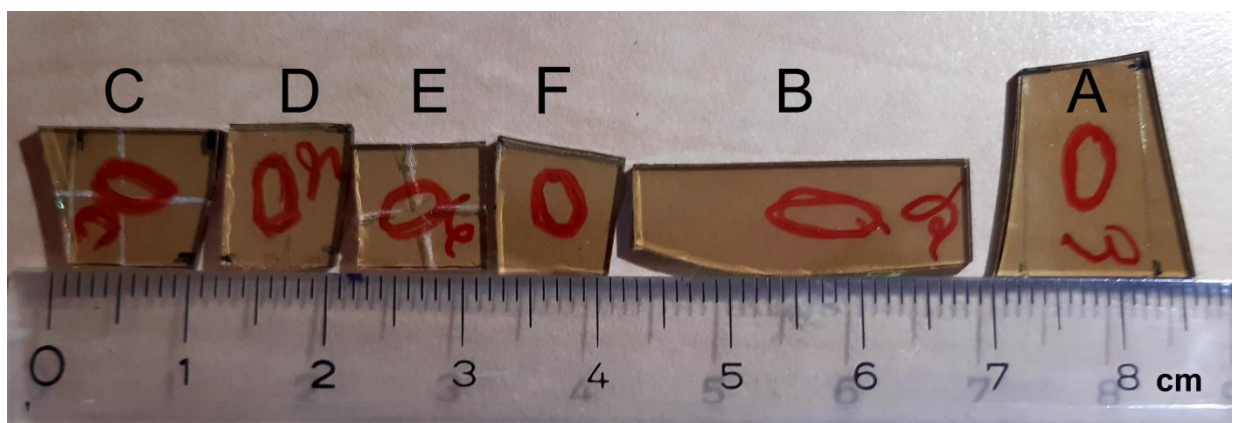
Vzorky jsou připravené metodou reaktivního vysokovýkonného magnetronového naprašování. Na podložní sklíčko je nanášena tenká vrstva o tloušťce v řádu stovek nanometrů z terče oxidu zinečnatého dopovaného 1,3 % wt. Al (váhové procento hliníku). Tento proces probíhá ve vakuové komoře, do které je napuštěna směs argonu a kyslíku. Tlak argonu při depozici dosahoval konstantní hodnoty 2 Pa pro oba vzorky. Parciální tlak kyslíku u vzorku 34 dosahoval hodnoty 0,18 Pa a délka napěťového pulzu byla 400 mikrosekund. Pro druhý vzorek 50 byl



parciální tlak kyslíku roven 0,22 Pa a délka napěťového pulzu byla 800 mikrosekund. Pro oba vzorky byla průměrná terčová výkonová hustota pulzu v  $150 \text{ Wcm}^{-2}$ . Pro vzorek 34 má takto nanesená vrstva tloušťku 487 nm. Pro vzorek 50 má takto nanesená vrstva tloušťku 555 nm. Po nanesení vrstvy byly pomocí diamantové tužky vzorky nařezány a nalámány na čtvercové tvary, které by v ideálním případě měly mít rozměr 8,5x8,5 mm. Při takové velikosti je zaručeno, že všechny hroty pro měření van der Pauwovou metodou se budou dotýkat vodivého povrchu vzorků v blízkosti rohů čtvercové destičky. Pro každý vzorek máme vyrobený i jeden větší tvar, který ale není pravidelný, jeho tvar připomíná rovnoramenný lichoběžník. Jednotlivé vzorky byly označeny pomocí malého písmenka latinky. Na Obr. 4.5 a Obr. 4.6 jsou zobrazeny nalámané vzorky, jejich velikost dokresluje přiložené pravítko.



**Obr. 4.5** Geometrie a měřítko nalámaných vzorků 34



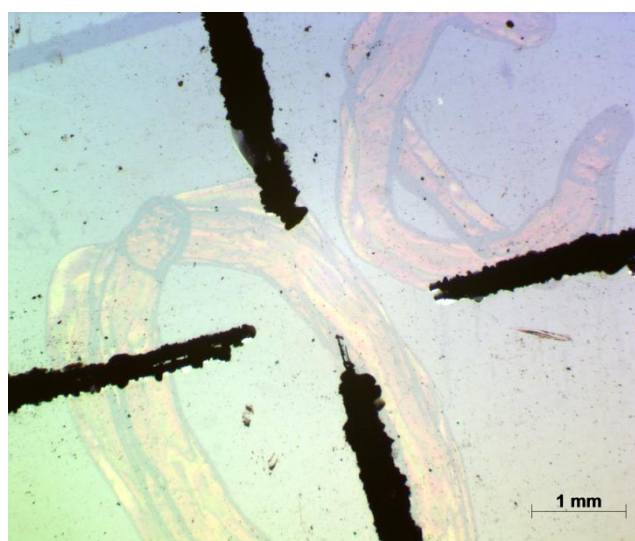
**Obr. 4.6** Geometrie a měřítko nalámaných vzorků 50

Měřené vzorky jsou dále upraveny pomocí diamantové tužky tak, že se posuvným měřítkem změní jednotlivé středy každé strany. Protilehlé středy stran se spojí pomocí pravítka a od každého středu protilehlých krajů stran se vedou pomocí diamantové tužky stejně dlouhé

vrypy (viz. např. vzorek 34a na Obr.4.5). Při vytváření vrypu dochází k úplnému odstranění tenké vrstvy ze substrátu. Detailní pohled na vzorek s vrypem byl realizován pomocí optického mikroskopu (viz Obr. 4.7). Je velmi důležité, aby nedošlo k poškození tenké vrstvy ve středu vzorku, neboť je potřeba zachovat vodivé spojení mezi všemi čtyřmi rohy, ve kterých jsou umístěny měřící hroty. K tomuto poškození došlo u druhého vrypu u vzorku 34a. Dokud bude splněna tato podmínka, lze zvyšovat velikost vrypu. Tímto způsobem byly postupně připraveny a proměřeny vzorky 50c a 50e se dvěma délkami vrypu, jak je uvedeno v Tab. 4.1.

**Tab. 4.1** Délka vrypu pro vzorky 34a, 50c a 50e

Měřený vzorek	34a	50c	50e
Délka vrypu 1 [mm]	3,5	3,0	2,2
Délka vrypu 2 [mm]	x	4,5	4,0

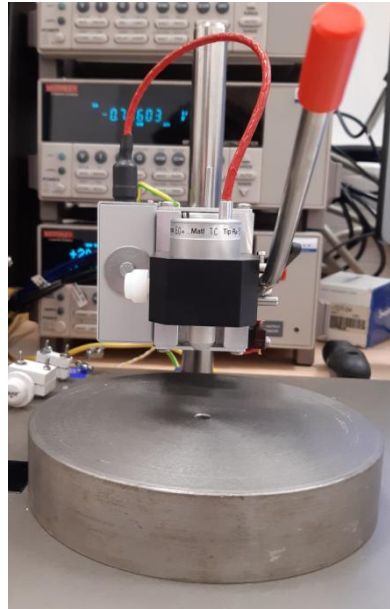


**Obr. 4.7** Detailní pohled na střed vzorku 50c pod optickým mikroskopem

#### 4.4. Postup měření elektrických vlastností

U měření pomocí čtyřbodové metody se měřený vzorek umístil pod čtyři hroty a pomocí červené páky došlo k vodivému spojení se všemi čtyřmi kontakty, viz Obr. 4.8. Stlačování páky směrem dolů se provádí do doby, než dojde k slyšitelnému cvaknutí. Toto cvaknutí znamená, že došlo k dostatečnému přitlačení hrotů do vodivé vrstvy a vzorek je připraven na měření. Pro každé takové umístění jsou proměřeny tři hodnoty elektrického proudu - 1 mA, 5 mA a 20 mA. Celkem došlo za těchto podmínek ke změření 15 konfigurací vzorků, konkrétněji vzorku 50e, 34c, 34d, 34a, 50a, 50b a 50c (některé vzorky se měřily vícekrát, ale při jiné poloze hrotů). U měření vzorků s vrypem se projevuje nelinearita, která nabývá dvou typů. V prvním případě

pro jedno umístění dochází při změně proudu k velkým rozptylům v rezistivitě. To bude nejspíše způsobené tím, že nedošlo k ideálnímu propojení hrotů s tenkou vodivou vrstvou (hrot se pravděpodobně zabodnul do vrypu). V druhém případě vypočtená rezistivita pro jedno umístění hrotů dosahuje stejných hodnot, ale jakmile se změní poloha, vypočtená rezistivita nabývá jiné hodnoty.



**Obr. 4.8** Přístroj na měření čtyřbodové metody

Při měření van der Pauwovou metodou se měřený vzorek umístil do vakuové komory tak, aby se všechny čtyři hroty dotýkaly okrajů vzorku v jeho rozích. Tato vakuová komora se vložila mezi dva elektromagnety (jak už bylo jednou popsáno v kapitole 4.2.). V prvním kroku se měřením pomocí dvou hrotů proměřila lineární závislost měřeného napětí na procházejícím proudu pro hodnoty 0,1 mA, 0,3 mA a 1 mA. Po tomto měření se zhodnotily naměřené výsledky, a pokud z nich bylo patrné, že jsou nelineární, tedy že kontakt některého z hrotů se vzorkem není ideální (tzv. ohmický kontakt), došlo ke změně umístění vzorku ve vakuové komoře. Když v ideálním případě vyšla lineární závislost napětí na procházejícím proudu pro všechny kontakty, následovalo měření van der Pauwovou metodou, kde už se využily všechny čtyři hroty. V momentě, kdy došlo ke spuštění měření, měřicí přístroje zahájily nejprve měření napětí bez magnetického pole a následně s magnetickým polem (o velikosti 1,4 T) při ustáleném proudu. Po proměření všech čtyř hodnot pro napětí (nejdříve bez magnetického pole, potom s ním) došlo ke zvýšení procházejícího elektrického proudu. Tímto způsobem došlo k proměření všech hodnot elektrického napětí v rozpětí proudu od 0,1 mA až do 0,85 mA při změně 0,025 mA a pak proudu 1 mA. Toto měření bylo provedeno celkem 14krát pro různé vzorky a pro různé velikosti vrypů.

## 5. Výsledky měření

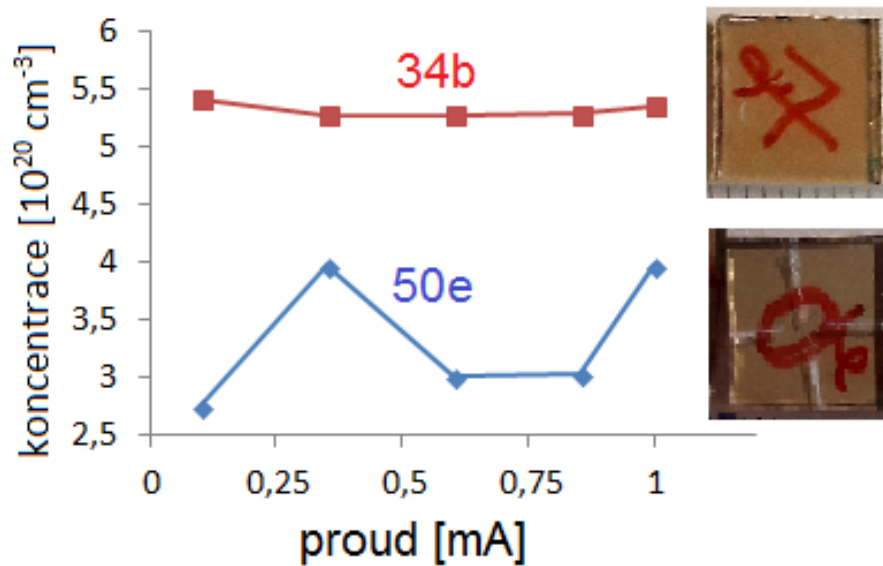
V této části bakalářské práce jsou prezentovány naměřené a vypočtené hodnoty rezistivity a koncentrace nosičů náboje pro zkoumané vzorky. V první části jsou pozorovány změny elektrických vlastností při změně proudu. Ve druhé části dochází k porovnání vzorků s označením 50, které byly připraveny za stejných podmínek depozice, ale následně byly nalámány na odlišné tvary. Ve třetí podkapitole se porovnává naměřená hodnota rezistivity pro van der Pauwovu metodu s naměřenou hodnotou pro čtyřbodovou metodu pro stejné vzorky. Ve čtvrté podkapitole je zkoumán vliv délky jednotlivých vrypů na měřený vzorek u měření pomocí van der Pauwovy metody.

### 5.1. Vliv velikosti proudu na naměřené hodnoty rezistivity a koncentrace

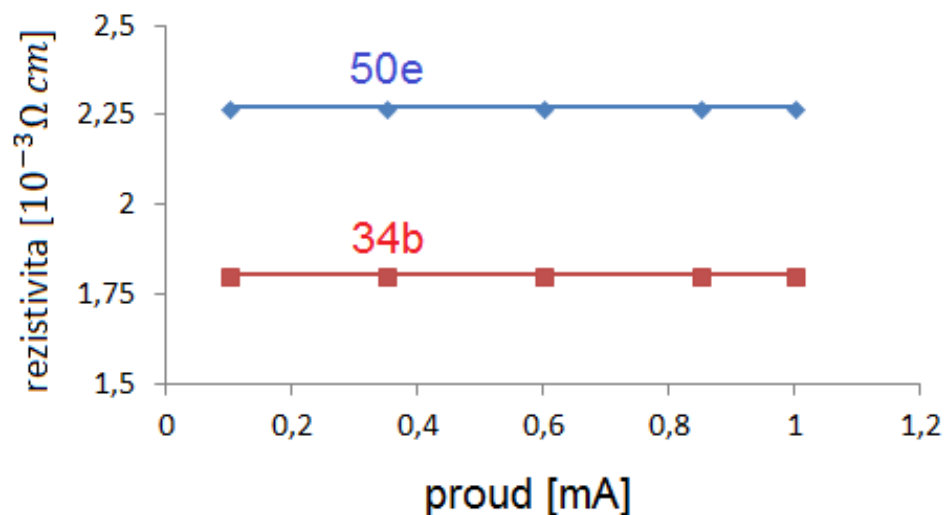
Dle postupu popsaného v kapitole 4.4. došlo k proměření dvou vzorků 34b a 50e, které mají čtvercový tvar o hraně do jednoho centimetru, pomocí van der Pauwovy metody a k následnému vypočtení hodnot rezistivity a koncentrace nosičů náboje. Oba použité vzorky jsou zobrazeny na Obr. 5.1 (podrobněji i s rozměry v kapitole 4.3.), kde je zobrazen jejich geometrický tvar.

**Tab. 5.1** Vypočtená koncentrace nosičů náboje a rezistivita pro vzorky 50e a 34b

Vzorek	50e		34b	
	Koncentrace elektronů [ $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ ]	Koncentrace elektronů [ $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ ]
0,1	2,75	2,27	5,41	1,81
0,35	3,91	2,27	5,27	1,81
0,6	3,01	2,27	5,28	1,81
0,85	3,02	2,27	5,28	1,81
1	3,97	2,27	5,36	1,81
Variační koeficient	17,33 %	X	1,19 %	X



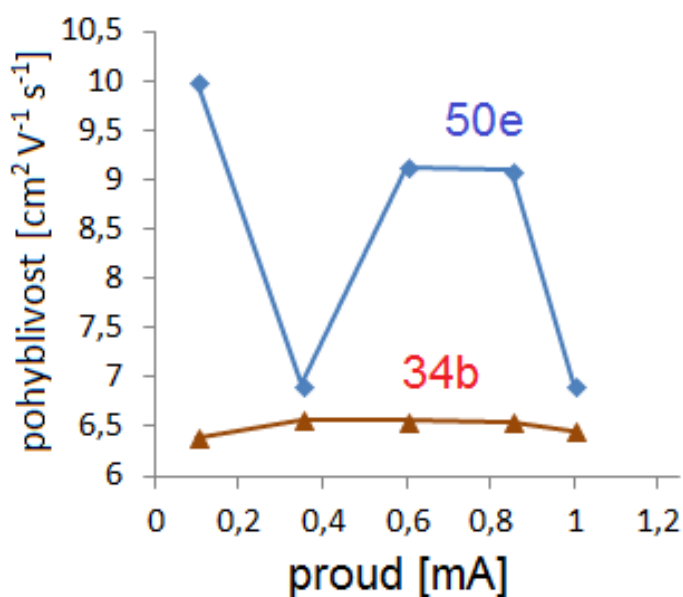
**Obr. 5.1** Graf koncentrace elektronů pro vzorky 34b a 50e i s jejich geometrickým tvarem



**Obr. 5.2** Graf rezistivity pro čtvercové vzorky 50e a 34b

Vypočtené hodnoty koncentrace elektronů a rezistivity jsou zaznamenány v Tab. 5.1 a graficky vyneseny na Obr. 5.1 a Obr. 5.2. Z naměřených a vypočtených hodnot pro oba vzorky je vidět, že při změně procházejícího elektrického proudu nedochází ke změně vypočtené hodnoty pro rezistivitu (uvažujeme na oboru třech platných čísel). I přes tuto zdánlivě vysokou přesnost (preciznost) je možné, že tato hodnota může být zatížena systematickou chybou měření a například a při změně polohy hrotů můžeme naměřit jinou hodnotu. V případech, kdy je hlavní důraz na zjištění co nejpřesnější hodnoty rezistivity nebo i koncentrace nosičů náboje měřeného vzorku, je dobré měřit vzorek vícekrát při změně polohy hrotů. Pro vzorek 50e

je vypočtená rezistivita konstantně na hodnotě  $2,27 \cdot 10^{-3} \Omega cm$  a pro druhý vzorek 34b, který byl připraven za jiných podmínek depozice (jak už bylo zmíněno v kapitole 4.3.), nám vyšla rezistivita  $1,81 \cdot 10^{-3} \Omega cm$ . Taková hodnota rezistivity odpovídá polovodičům, které mají vysokou elektrickou vodivost (viz kapitola 2.2). U vypočtených hodnot koncentrace elektronů pozorujeme u obou vzorků změnu se změnou proudu. Pro vzorek 50e koncentrace má nepravidelný průběh a variační koeficient vypočtených hodnot (vypočtený jako podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru) dosahuje 17,33 %. Druhý vzorek 34b má menší rozptyl vypočtených hodnot a jeho variační koeficient je výrazně menší (1,19 %). Ukazuje se tedy, že preciznost měření koncentrace je na první pohled výrazně nižší než u měření rezistivity. Naměřené hodnoty koncentrace elektronů v řádech  $10^{20} cm^{-3}$  jsou velmi vysoké a naznačují, že oba vzorky lze označit jako silně dopované transparentní vodivé oxidy (když uvážíme, že za polovodič již označujeme čisté germanium, které má koncentraci v řádech  $10^{13} cm^{-3}$ , a pro prvek draslík, který už řadíme ke kovům a má koncentraci v řádech  $10^{22} cm^{-3}$ ) [8].

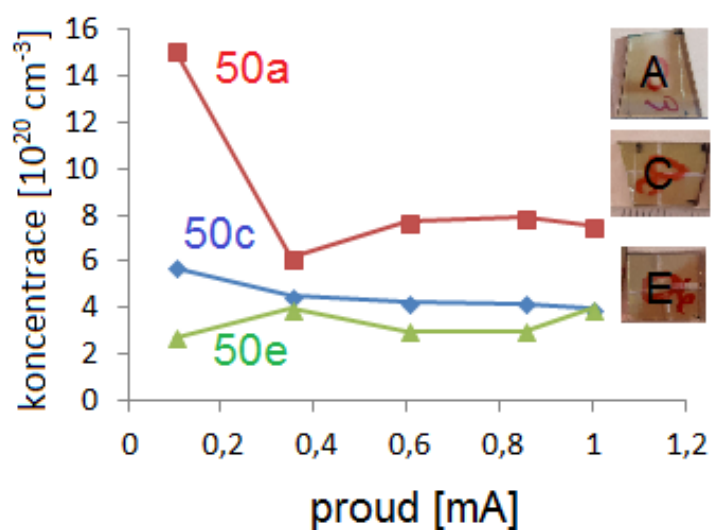


**Obr. 5.3** Graf pohyblivosti elektronů pro vzorky 50e a 34b

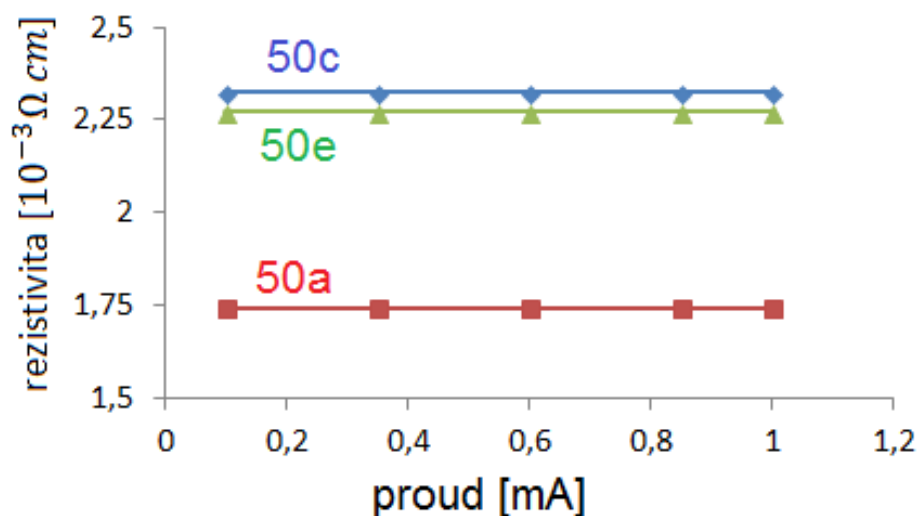
Na Obr. 5.3 je zobrazená pohyblivost nosičů náboje pro vzorky 50e a 34b, která svým průběhem se velmi podobá průběhu koncentrace nosičů náboje na Obr. 5.1. To je dané z definičního vztahu v kapitole 2.3. (konkrétněji viz 2.8). Vypočtená hodnota pohyblivosti nosičů náboje je závislá na vypočtené hodnotě pro koncentraci nosičů náboje. Naměřené hodnoty pohyblivosti elektronů v řádech jednotek  $cm^2 V^{-1} s^{-1}$  jsou typické pro nízkoteplotní depozice pomocí magnetronového naprašování [17].

## 5.2. Rozdíly mezi tvary vzorku 50

Pro vybraný vzorek 50 došlo k proměření jednotlivých tvarů bez úpravy vrypem pomocí diamantové tužky. Konkrétně byly změřeny varianty 50a, 50c a 50e zobrazené bez měřítka na Obr. 5.4 (pro přesné velikosti rozměrů je třeba se podívat zpět na Obr. 4.6 v kapitole 4.3.). Vzorek 50a je z této trojice největší a nejvíce se tvarem odchyluje od ideálního rozměru 8,5 x 8,5 mm. Vzorek 50c má prakticky ideální velikost jedné hrany, ale rozměr protilehlé hrany je větší než ideální, má tedy tvar lichoběžníka. Vzorek 50e má ideální čtvercový tvar i velikost. K nim vypočtené hodnoty rezistivity a koncentrace pro tyto vzorky jsou zaznamenány v Tab. 5.2 a Tab. 5.3. Tyto vypočtené hodnoty jsou vykresleny v Obr. 5.4 a Obr. 5.5.



Obr. 5.4 Graf koncentrace elektronů pro rozdílné tvary vzorku 50



Obr. 5.5 Graf rezistivity pro rozdílné tvary vzorku 50

**Tab. 5.2** Koncentrace elektronů pro jednotlivé vzorky 50 v závislosti na proudu

Vzorek	50a	50c	50e
Proud [mA]	Koncentrace elektronů [ $10^{20} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]	Koncentrace elektronů [ $10^{20} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]	Koncentrace elektronů [ $10^{20} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
0,1	15,12	5,75	2,75
0,35	6,20	4,52	3,97
0,6	7,76	4,22	3,01
0,85	7,88	4,20	3,02
1	7,55	3,96	3,97
Variační koeficient	39,76 %	15,72 %	17,33 %

**Tab. 5.3** Rezistivita pro jednotlivé vzorky 50 v závislosti na proudu

Tvar	50a	50c	50e
Proud [mA]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ ]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ ]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ ]
0,1	1,74	2,33	2,27
0,35	1,74	2,33	2,27
0,6	1,74	2,33	2,27
0,85	1,74	2,33	2,27
1	1,74	2,33	2,27

Vypočtené hodnoty by, vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o stejné vzorky a jsou měřeny za stejných podmínek, měly dosahovat stejné hodnoty. Z grafu rezistivity na Obr. 5.5 je zřejmé, že hodnota rezistivity pro vzorek 50a je menší o 23 % než pro zbylé dva vzorky. Tato odchylka je nejspíše způsobena velikostí vzorku, protože vzorek 50a má výrazně větší tvar než zbylé dva vzorky. Jeden z předpokladů van der Pauwovy metody je skutečnost, že měřicí hroty budou umístěny blízko obvodu vzorku [11,15]. Dle teoretických výpočtů, s rostoucí vzdáleností hrotů od okraje vzorku by měla naměřená rezistivita klesat [15,16]. Jelikož vzdálenost mezi měřicími hroty je u použitého přístroje neměnná, můžeme předpokládat, že pro rostoucí rozměry vzorku bude klesat rezistivita a měření je méně přesné. Toto tvrzení podporuje porovnání rezistivity ideálního vzorku 50e, který by měl dosahovat přesnějších hodnot, s již zmíněným vzorkem 50a. Ale nemůžeme to s jistotou tvrdit, protože jsme provedli jenom jedno měření za stejných podmínek. Z Obr. 5.4 grafu koncentrace nosičů náboje vidíme, že vzorek s největším rozměrem (vzorek 50a) má největší hodnotu variačního koeficientu a to skoro 40 %.



Tato skutečnost potvrzuje již zmíněnou domněnku, že se zvětšujícími se rozměry vzorku se měření stává méně přesné. U dvou zbylých vzorků 50c a 50e má grafický průběh vypočtených hodnot koncentrace nosičů náboje menší rozptyl než pro vzorek 50a a variační koeficienty dosahují hodnot 15,72 % a 17,33. Když uvážíme, že vzorek 50c nemá zcela ideální tvar a rozměry oproti čtvercovému vzorku 50e, zjistíme, že malá nepřesnost tvaru vzorku při přípravě zřejmě nemá zásadní vliv na přesnost měření.

### 5.3. Porovnání van der Pauwovy a čtyřbodové metody

V této části ověříme, zda vypočtená rezistivita z van der Pauwovy metody pro jednotlivé vzorky se shoduje s rezistivitou vypočtenou z naměřených hodnot u čtyřbodové metody.

**Tab. 5.4** Rezistivita vzorků 34b a 50f změřená van der Pauwovou a čtyřbodovou metodou

Van der Pauwova metoda			Čtyřbodová metoda		
Vzorek	34b	50f	Vzorek	34b	50f
Proud [mA]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega cm$ ]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega cm$ ]	Proud [mA]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega cm$ ]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega cm$ ]
0,1	1,81	2,23	1	1,78	2,36
0,35	1,81	2,23	5	1,77	2,25
0,6	1,81	2,23	20	1,82	2,25
0,85	1,81	2,23			
1	1,81	2,23			

Naměřené a vypočtené hodnoty rezistivity z Tab. 5.4 se pro měřený vzorek 34b liší maximálně o 2,5 %. Pro van der Pauwovu metodu jsme naměřili hodnotu  $1,81 \cdot 10^{-3} \Omega cm$  pro všechny velikosti proudu. Při měření vzorku 34b pomocí čtyřbodové metody se hodnoty mírně liší v závislosti na procházejícím proudu, přičemž aritmetický průměr nabývá hodnoty  $1,79 \cdot 10^{-3} \Omega cm$ . Pro druhý vzorek 50f byla naměřená hodnota rezistivity pomocí van der Pauwa rovna  $2,23 \cdot 10^{-3} \Omega cm$ . Pro rezistivitu vzorku 50f vypočtenou pomocí čtyřbodové metody dosahuje aritmetický průměr rezistivit hodnoty  $2,29 \cdot 10^{-3} \Omega cm$ . Z naměřených a vypočtených hodnot rezistivity pro obě metody a oba vzorky můžeme říct, že hodnoty se výborně shodují a vzorky s označením 50 vykazují vyšší hodnoty rezistivity než vzorky 34.

## 5.4. Úprava geometrie pro zlepšení přesnosti měření van der Pauwovou metodou

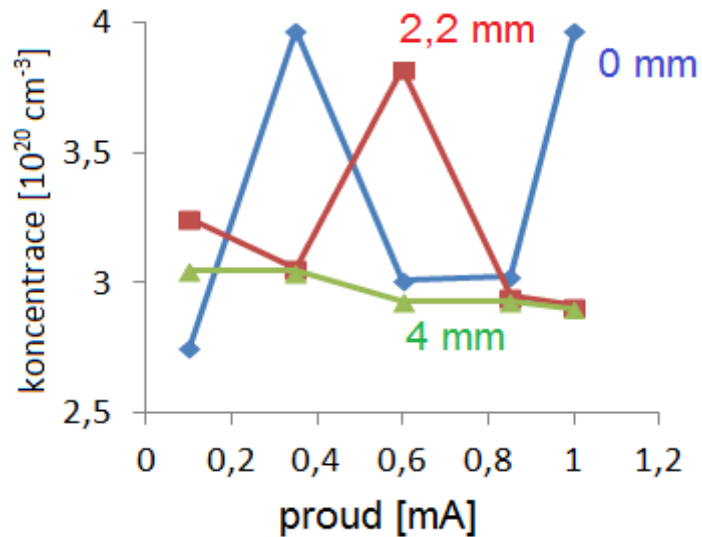
Na začátku měření byly měřené vzorky 34a, 50c a 50e změřeny van der Pauwovo metodou bez úprav pomocí diamantové tužky (měření probíhalo tak, jak je napsané v kapitole 4.4.). Po proměření napětí při různých proudech byly vzorky upraveny pomocí diamantové tužky (jak je popsáno v kapitole 4.3.). Délky vrypů pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v Tab. 5.5. Pro vzorek 50e jsou naměřené a vypočtené hodnoty rezistivity a koncentrace nosičů náboje zaznamenány v Tab. 5.6 a jejich grafický průběh při změně proudu vneseny v Obr. 5.6 a Obr. 5.7. Pro druhý vzorek 50c je rezistivita a koncentrace nosičů náboje v Tab. 5.7 a grafy jsou zobrazeny na Obr. 5.8 a Obr. 5.9.

**Tab. 5.5** Délka vrypu při jednotlivých měřeních pro dva vzorky 50c a 50e

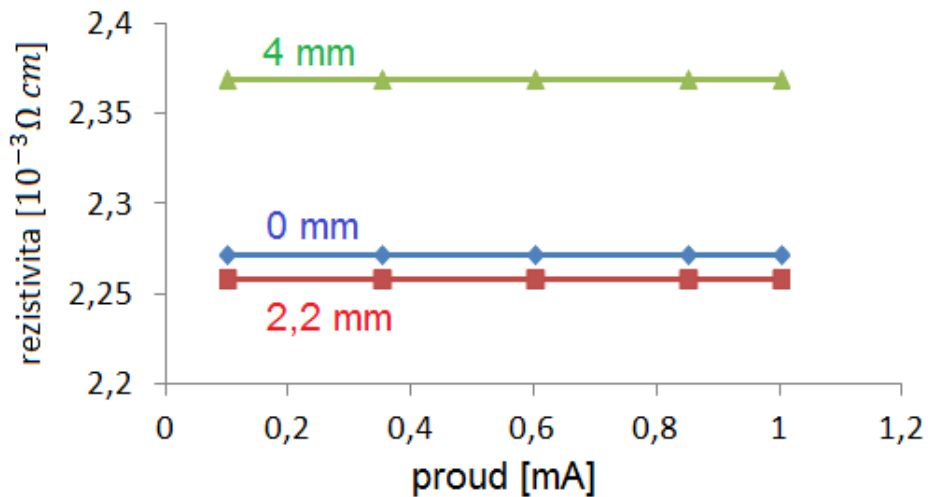
Měřený vzorek	50c	50e
Délka vrypu 1 [mm]	3,0	2,2
Délka vrypu 2 [mm]	4,5	4,0

**Tab. 5.6** Vypočtené hodnoty rezistivity a koncentrace nosičů náboje pro vzorek 50e

Vzorek	50e					
	0 mm		2,2 mm		4,0 mm	
Délka vrypu						
Proud [mA]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ ]	Koncentrace elektronů [ $10^{20} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ ]	Koncentrace elektronů [ $10^{20} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]	Rezistivita [ $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ ]	Koncentrace elektronů [ $10^{20} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
0,1	2,27	2,75	2,26	3,25	2,37	3,05
0,35	2,27	3,97	2,26	3,06	2,37	3,05
0,6	2,27	3,01	2,26	3,82	2,37	2,93
0,85	2,27	3,02	2,26	2,95	2,37	2,93
1	2,27	3,97	2,26	2,91	2,37	2,90
Variační koeficient	X	17,33 %	X	11,66 %	X	2,34 %



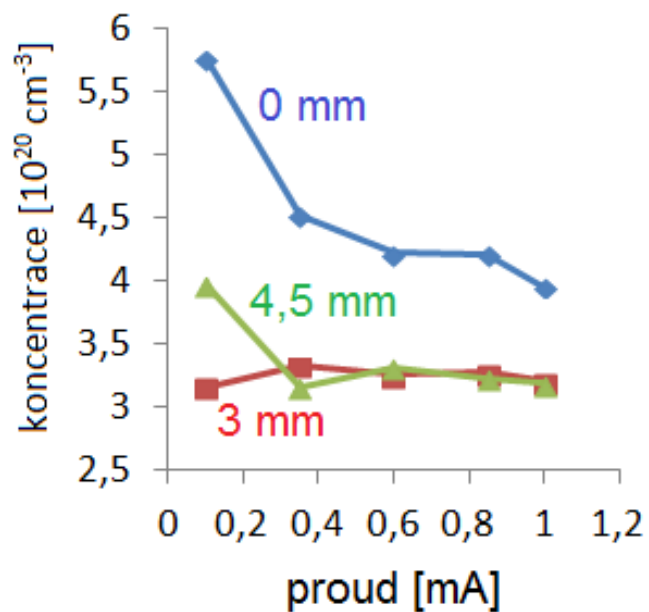
Obr. 5.6 Graf koncentrace elektronů v závislosti na délce vrypu pro vzorek 50e



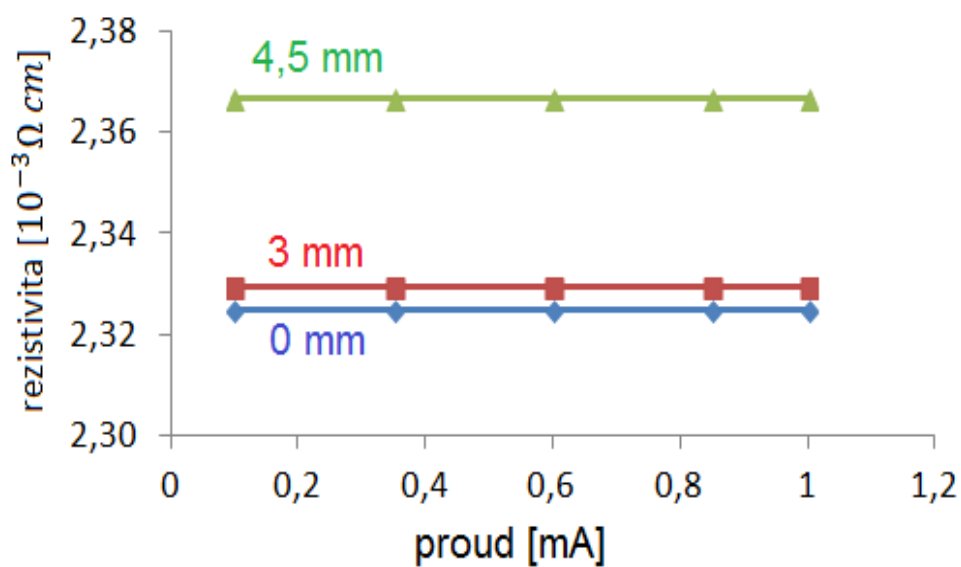
Obr. 5.7 Graf rezistivity v závislosti na délce vrypu pro vzorek 50e

Tab. 5.7 Vypočtené hodnoty rezistivity a koncentrace nosičů náboje pro vzorek 50c

Vzorek	50c					
	0 mm		3,0 mm		4,5 mm	
Proud [mA]	Rezistivita [10 <sup>-3</sup> Ω cm]	Koncentrace elektronů [10 <sup>20</sup> · cm <sup>-3</sup> ]	Rezistivita [10 <sup>-3</sup> Ω cm]	Koncentrace elektronů [10 <sup>20</sup> · cm <sup>-3</sup> ]	Rezistivita [10 <sup>-3</sup> Ω cm]	Koncentrace elektronů [10 <sup>20</sup> · cm <sup>-3</sup> ]
0,1	2,32	5,75	2,33	3,16	2,37	3,96
0,35	2,32	4,52	2,33	3,33	2,37	3,15
0,6	2,32	4,22	2,33	3,26	2,37	3,32
0,85	2,32	4,20	2,33	3,28	2,37	3,23
1	2,32	3,96	2,33	3,20	2,37	3,18
Variační koeficient	X	15,72 %	X	2,03 %	X	9,97 %

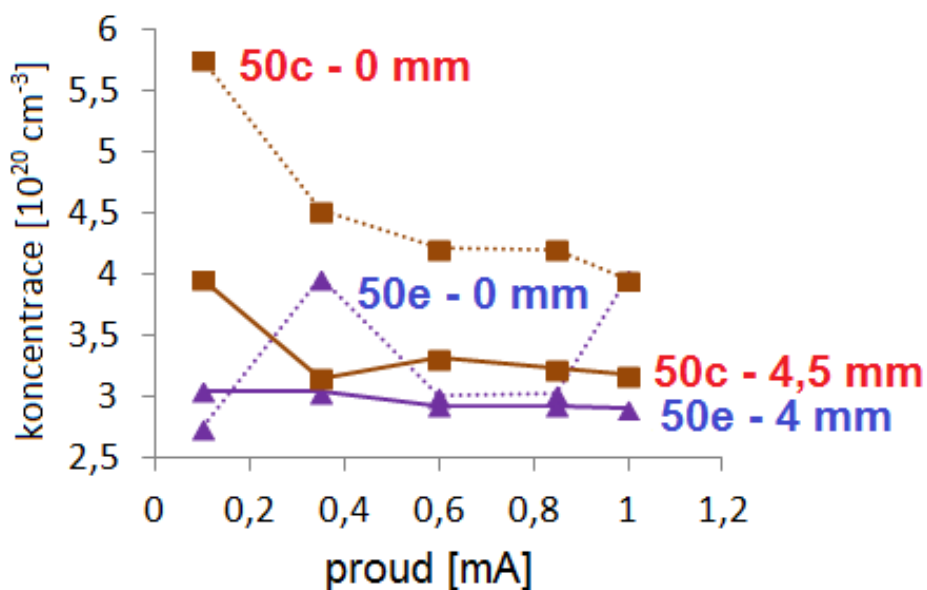


Obr. 5.8 Graf koncentrace elektronů v závislosti na délce vrypu pro vzorek 50c

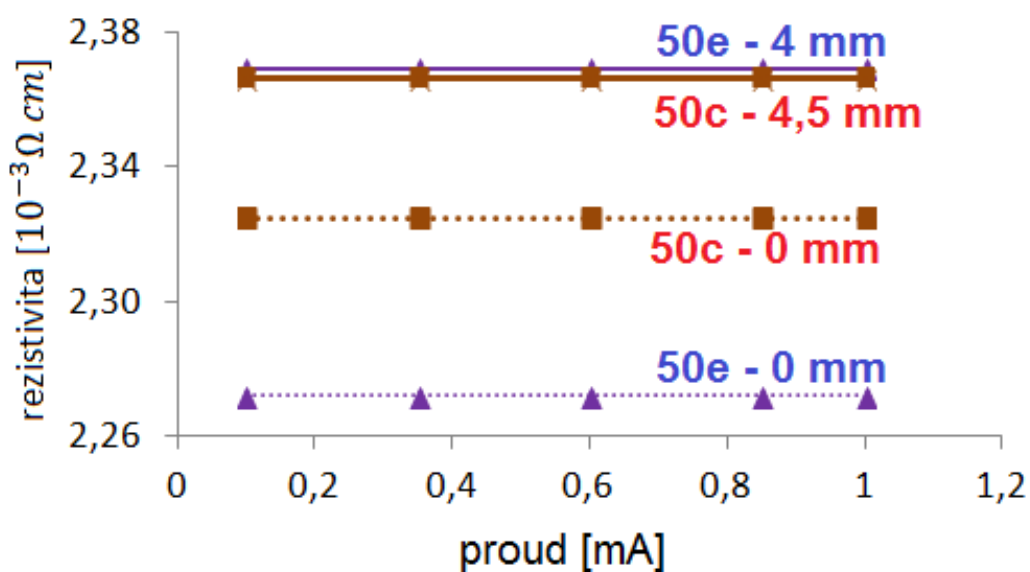


Obr. 5.9 Graf rezistivity v závislosti na délce vrypu pro vzorek 50c

Pro oba vzorky, jak pro vzorek 50e (viz Obr. 5.7) tak i pro vzorek 50c (viz Obr. 5.9), s rostoucí délkou vrypu roste hodnota rezistivity. Nemůžeme s jistotou říct, která hodnota je přesnější a víc odpovídá skutečné hodnotě rezistivity pro nanosenou tenkou transparentní vodivou vrstvu. Mohli bychom předpokládat z podmínky pro měření van der Pauwovy metody, která předpokládá umístění hrotů na obvodu vzorku [15], a při uvážení soustředění procházeného elektrického proudu více do středu vzorku při větší délce vrypu, že vliv vzdálenosti hrotu od okraje vzorku bude menší než při měření bez vrypu. Tento náš předpoklad je zmíněn v původním článku van der Pauwa z roku 1958 [16]. Když se podíváme do Tab. 5.6, zjistíme, že variační koeficient naměřené koncentrace elektronů s rostoucí délkou vrypu klesá. Při měření bez vrypu pro vzorek 50e, který má ideálnější tvar než vzorek 50c, vidíme z Obr. 5.6 grafu koncentrace nosičů náboje největší rozptyl vypočtených hodnot pro měření bez vrypu a variační koeficient tohoto měření dosahuje největší hodnoty, a to 17,33 %. Pro měření téhož vzorku s vrypem o délce 2,2 mm má variační koeficient hodnotu 11,66 %. Při délce vrypu 4 mm má graf koncentrace pro elektrony konstantnější průběh a variační koeficient nabývá hodnoty 2,34 %. Pro druhý vzorek (tedy vzorek 50c, Obr. 5.8) měření koncentrace nosičů náboje nevyšlo úplně podle předpokladu, protože pro nejdelší délku vrypu je variační koeficient větší než pro kratší vryp. To je způsobené velkou odchylkou první hodnoty (pro nejmenší hodnotu proudu), což je zřejmě důsledkem toho, že při malé hodnotě procházeného proudu roste relativní chyba měření napětí. S rostoucím proudem dochází k ustálení hodnot koncentrace nosičů náboje na stejných hodnotách jako pro délku vrypu 3 mm a jejich rozptyl se výrazně zmenšuje. Této skutečnosti si lze všimnout i u vzorku 50e.



**Obr. 5.10** Graf koncentrace elektronů pro vzorky 50e a 50c s nulovým a maximálním vrypem



**Obr. 5.11** Graf rezistivity pro vzorky 50e a 50c s nulovým a maximálním vrypem

Z grafu na Obr. 5.10 vidíme, že pro největší délku vrypu se hodnoty koncentrace nosičů náboje ustalují se zvyšující se hodnotou elektrického proudu a rozptyl se zmenšuje mezi dvěma po sobě jdoucími hodnotami koncentrace nosičů náboje. Dále je patrné, že koncentrace elektronů pro nejdelší vrypy pro oba vzorky se blíží více k sobě. Jak je vidět v druhém grafu na Obr. 5.11, rezistivita pro oba vzorky s největší délkou vrypu nabývá prakticky totožné hodnoty  $2,37 \cdot 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ . To potvrzuje, že upravený vzorek umožňuje nejen preciznější, ale i přesnější měření rezistivity a koncentrace nosičů náboje.

## 6. Závěr

Bakalářská práce měla dva hlavní cíle. Prvním cílem bylo seznámit se s teoretickými předpoklady o elektrických vlastnostech vodivých pevných látek, kde hlavní cíl byl kladen na transparentní vodivé oxidy a způsoby jejich měření (především měření rezistivity a koncentrace nosičů náboje). Druhým cílem bylo zkoumání, jaký vliv na přesnost měření rezistivity a koncentrace nosičů náboje má tvar geometrie měřeného vzorku a jestli doporučené geometrie typu řecký kříž a disk mají zásadný vliv na přesnost a preciznost měření.

První cíl je probrán v první polovině této bakalářské práce, konkrétněji v kapitole dvě, kde jsou popsány teoretické a empirické zákony. Nejdříve byly popsány transparentní vodivé oxidy obecně. V další části, byly popsány základy elektrické vodivosti pevných látek, rozdíly mezi izolanty, kovy a polokovy a teorie Hallova jevu. Kapitola čtyři je zaměřena na přípravu dvou transparentních vzorků AZO a jejich způsob měření v závislosti na elektrickém proudu pro van der Pauwovu metodu. Je zde také popsána navržená úprava vzorku provedená s cílem dosáhnout geometrie typu řecký kříž a disk, a tím zlepšit přesnost měření jeho elektrických vlastností. V páté části jsou shrnuté naměřené a vypočtené výsledky. Při porovnání rozdílných tvarů vzorků při měření van der Pauwovou metodou zjišťujeme, že velké vzorky nejsou ideální k měření hodnot rezistivity a koncentrace nosičů náboje, protože dosahují vyšší hodnoty variačního koeficientu u koncentrace nosičů náboje. Naměřené hodnoty koncentrace elektronů pro naše měřené vzorky dosahují hodnot v řádech  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , to naznačuje silně dopované transparentní vodivé oxidy. Zjistili jsme, že naměřené a vypočtené hodnoty rezistivity dosahují stejných hodnot při měření van der Pauwovou a čtyřbodovou metodou a to přibližně v řádech  $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ , což značí velmi dobře elektricky vodivý polovodič.

Hlavní poznatkem z kapitoly 5.4 jsou pozorovaná zlepšení opakovatelnosti a přesnosti měření elektrických vlastností u van der Pauwovy metody pro oba vzorky s dlouhým vrypem. Takto upravené vzorky vykazovaly výrazně nižší variační koeficient pro koncentrace elektronů naměřených při pěti různých hodnotách proudu. Při zanedbání očividně nejméně přesného měření pro nejnižší hodnotu proudu (u vzorku 50c), byly variační koeficienty pro oba vzorky menší než 3%. Oba vzorky, jenž byly vyrobeny za stejných podmínek depozice a upraveny vrypem, vykazovaly (zejména při vyšší hodnotě elektrického proudu) totožné hodnoty jak rezistivity tak i koncentraci elektronů.

## 7. Použité zdroje

- [1] *Performing van der Pauw Sheet Resistance Measurements Using the Keithley S530 Parametric Tester* [online]. Keithley, 2012, [cit.23.5.2021]. Dostupné z: [https://download.tek.com/document/S530\\_VanDerPauwSheetRstnce.pdf](https://download.tek.com/document/S530_VanDerPauwSheetRstnce.pdf)
- [2] NĚMEC, Josef. *Optimalizace naprašovaných ZnO:Al vrstev pro flexibilní nanogenerátor napětí*. Plzeň, 2017. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Fakulta strojní. Katedra materiálu a strojírenské metalurgie. Vedoucí práce Petr Novák [cit.23.5.2021]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/27350>
- [3] TAHAR, Radhouane BH et al. *Tin doped indium oxide thin films: Electrical properties*. Journal of Applied Physics. 1998, 83, 2631
- [4] *Aluminum-doped Zinc Oxide (AZO) Transparent Film Coating*. [online]. Materion, 2021 [cit.4.5.2021] Dostupné z: <https://materion.com/resource-center/product-data-and-related-literature/inorganic-chemicals/oxides/azo-transparent-conductive-coating>
- [5] DVORSKÝ, Vojtěch. *Transparentní elektricky vodivé vrstvy oxidu cíničitého připravené z anorganických prekurzorů*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce Petr Dzik. [cit. 23.5.2021]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/65256>.
- [6] GINLEY, David, HOSONO, Hideo, PAINE, David C. *Handbook of Transparent Conductors*. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1637-2 978-1-4419-1638-9
- [7] REICHL, Jaroslav, VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky, Hallův jev* [online]. 2006. [cit. 3.5.2021] Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/294-halluv-jev>
- [8] KITTEL, Charles, MATYÁŠ, Miloš. *Úvod do fyziky pevných látek: Celost. vysokošk. učebnice pro stud. matematicko-fyz. a přírodověd. fakult.* 1. vydání. Praha: Academia, 1985.
- [9] REICHL, Jaroslav, VŠETIČKA, Martin. *Encyklopedie fyziky, Elektrické vlastosti pevných látek* [online]. 2006. [cit. 3.5.2021] Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/773-elektricke-vlastnosti-pevnych-latek>
- [10] KRAUS, Ivo, FRANK, Helmar, KRATOCHVÍLOVÁ, Irena. *Úvod do fyziky pevných látek*. Praha: České vysoké učení technické, 2001. ISBN 978-80-01-02286-3.



- [11] NOVOTNÝ, Karel. *Elektrická vodivost nanovláknenných materiálů*. Liberec, 2013. Bakalářská práce. Technická univerzita. Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií.
- [12] TÖLG, Tomáš a kolektiv. *Fyzikální praktikum. Měření rezistivity polovodičů čtyřbodovou metodou*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002. ISBN 80-7082-851-X
- [13] *Hall Measurement Systems*. [online] MMR Technologies. [cit. 3.5.2021] Dostupné z: <http://www.mmr-tech.com/PDFs/HallProductBrochure.pdf>
- [14] *Hall User Manual*. [online] MMR Technologies. [cit. 3.5.2021] Dostupné z: <http://www.mmr-tech.com/PDFs/HallUserManual.pdf>
- [15] KOON, Daniel. Effect of contact size and placement, and of resistive inhomogeneities on van der Pauw measurements. *Review of Scientific Instruments*. 1989, 60, 271-274.
- [16] VAN DER PAUW, Leo J. A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape. *Philips Research Reports*. 1958, 13, 1-9.
- [17] REZEK, Jiří et al. High-rate reactive high-power impulse magnetron sputtering of transparent conductive Al-doped ZnO thin films prepared at ambient temperature. *Thin Solid Films*. 2019, 679, 35-41.