

Diagnostické metody pro určení prahu perkolace ultratenkých vrstev wolframu

Ing. Tomáš Martínek, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Teze disertační práce

**Diagnostické metody pro určení prahu perkolace
ultratenkých vrstev wolframu**

**Diagnostic Methods for Percolation Threshold Determination of
Ultra-Thin Tungsten Layers**

Autor: **Ing. Tomáš Martínek, Ph.D.**

Studijní program: Inženýrská informatika P3902
Studijní obor: Inženýrská informatika 3902V023

Školitel: doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
Konzultant: Ing. Milan Navrátil, Ph.D.

Oponenti: prof. Mgr. Petr Vašina, Ph.D.
doc. Mgr. Šimon Kos, Ph.D.
Mgr. Alexej Vetuško, Ph.D.

Zlín, září 2019

© Tomáš Martínek

Klíčová slova: *perkolační práh, ultratenké vrstvy, povrchová rezistance, luminiscence*

Key words: *percolation threshold, ultra-thin layers, sheet resistance, luminescence*

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-864-2

Abstrakt

Práce je zaměřena na určení perkolačního prahu ultratenkých vrstev wolframu připravených pomocí radiofrekvenčního magnetronového naprašování. Charakterizace v nanometrové oblasti byla provedena pomocí mikroskopických technik. Dále bylo provedeno měření stejnosměrné elektrické povrchové vodivosti, dielektrické konstanty pomocí THz spektroskopie v časové doméně, optické propustnosti, optických spekter pomocí UV/VIS spektrofotometrie a luminiscenčních spekter. Z výsledků těchto měření byl určen elektrický perkolační práh na hodnotě $(1,79 \pm 0,28)$ nm.

Abstract

Main goal of this work is to determine a percolation threshold of ultra-thin tungsten films deposited by radio-frequency magnetron sputtering. Nanoscale characterization of these films was done by microscopic techniques. Electrical DC surface conductivity, dielectric constant using THz-TDS, optical transmittance, UV/VIS spectrophotometry and luminescence spectra were measured. Electrical percolation threshold of these films was calculated from results of these measurements at (1.79 ± 0.28) nm.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl vyjádřit své díky všem lidem, kteří se na této práci podíleli a bez kterých by nemohla vzniknout. Mé díky patří zejména mému školiteli doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. a také Ing. Milanu Navrátilovi, Ph.D., který se podílel na této práci jako konzultant. Dále bych rád poděkoval všem svým kolegům a také rodině za veškerou podporu, které se mi dostávalo. Děkuji vám!

Obsah

1.	Úvod.....	5
2.	Cíle disertační práce.....	6
3.	Experimentální část.....	6
3.1	Příprava vzorků.....	6
3.2	Topografie.....	7
3.3	Elektrické vlastnosti.....	10
3.4	Optické vlastnosti	12
3.4.1	Optická propustnost.....	12
3.4.2	Spektrofotometrie	13
3.4.3	Luminiscenční spektroskopie	13
3.5	Práh perkolace.....	14
4.	Diskuze.....	19
5.	Přínos práce pro vědu a praxi	20
6.	Závěr	21
7.	Seznam použité literatury	22
8.	Seznam obrázků	25
9.	Seznam použitých symbolů a zkratek.....	26

1. ÚVOD

Nanotechnologie jsou jedním z nejperspektivnějších vědních oborů s možným dopadem na všechny části lidského bytí a vědění. Jednou z jejich částí jsou tenké vrstvy. Tyto vrstvy jsou zajímavou oblastí fyziky, protože jejich vlastnosti jsou na pomezí mikrometrických struktur, kde se uplatňuje klasická fyzika, a nanometrických struktur, kde se uplatňuje fyzika kvantová. Jejich vlastnosti se tak mohou dramaticky měnit podle jejich tloušťky, materiálu či substrátu, na kterém jsou nanoseny, proto jsou ultratenké vrstvy zajímavé z aplikačního hlediska.

Z matematického pohledu můžeme tenké vrstvy definovat jako homogenní pevný materiál obsažený mezi dvěma paralelními rovinami sahajícími do nekonečna ve dvou rozměrech (x,y) a omezený podél třetího rozměru (z), který je kolmý k rovině $x-y$, kde rozměr ve směru z je tloušťka vrstvy. Tenké vrstvy můžeme dále rozdělit do tří oblastí v závislosti na jejich tloušťce a to na ultratenké (obvykle do 100 Å), tenké (obvykle 100 až 1000 Å) a relativně silné (obvykle větší než 1000 Å). [1]

Tenké vrstvy mají veliký potenciál pro uplatnění v průmyslu, například jako difúzní bariéry ve výrobě elektrických komponent [2]. Tyto vrstvy jsou často používány i v polovodičích [3]. Dalšími příklady může být použití ve fotonice [4], optoelektronice [5], spintronice [6] nebo jako povrchová úprava pro zlepšení mechanických vlastností a teplotní stability materiálů [7].

Měřicí a diagnostické metody pro charakterizaci ultratenkých vrstev jsou výrazně omezené kvůli velikosti struktur, která se může blížit i atomárnímu rozlišení. Proto se pro jejich charakterizaci dá použít pouze omezené množství metod – RTG difrakce [8], spektroskopie [9] a mikroskopie – elektronová mikroskopie a mikroskopie se skenující sondou.

Depozice ultratenkých vrstev se dá provést mnoha způsoby a to ať už pomocí fyzikálních nebo chemických metod [10][11][12][13]. V případě této práce byla depozice provedena pomocí radiofrekvenčního magnetronového naprašování. Takto byly nanoseny vrstvy wolframu na substráty čištěného křemíku, čištěného křemíku s 200 nm termickou vrstvou oxidu křemičitého a na slídu. Ultratenké vrstvy wolframu jsou používány například v RTG optice pro vícevrstvá materiálová zrcadla [14][15][16][17][18][19][20].

Současným trendem v oblasti ultratenkých vrstev jsou vrstvy monoatomární. Jedná se o vrstvy s dvourozměrným uspořádáním atomů. Mezi jedny ze současně nejvíce zkoumaných patří například grafen [21] či silicen [22]. Jedná se o materiály s unikátními elektrickými a mechanickými vlastnostmi.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Určení perkolačního prahu je jedním ze základních parametrů při vytváření ultratenkých vrstev a nutný předpoklad pro následné aplikace těchto vrstev ať už v oblasti senzorové elektroniky nebo v oblasti bezpečnosti – například vytváření nanoznaček, které by mohly sloužit pro skryté identifikační značení předmětů, což by představovalo nové využití této technologie.

Na základě spolupráce mezi pracovníky Ústavu přístrojové techniky AV a pracovníky Ústavu elektroniky a měření Fakulty aplikované informatiky při Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně postupně vzniknul požadavek na diagnostiku těchto ultratenkých vrstev.

Wolfram byl zvolen z důvodu jeho využití jako jedné ze složek vícevrstvých materiálových zrcadel pro RTG optiku, která má na Ústavu přístrojové techniky dlouholetou tradici.

Z provedených prací, vlastních zkušeností, kontaktů a konzultací s pracovníky z Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, Ústavu přístrojové techniky AV ČR a Fyzikálního ústavu AV ČR bylo zvoleno zaměření disertační práce na **vývoj diagnostických metod pro určení prahu perkolace ultratenkých vrstev wolframu** připravených pomocí fyzikálních depozičních technik, konkrétně pomocí radiofrekvenčního magnetronového naprašování.

Cílem této práce tedy je **určení perkolačního prahu** u ultratenkých vrstev wolframu.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ

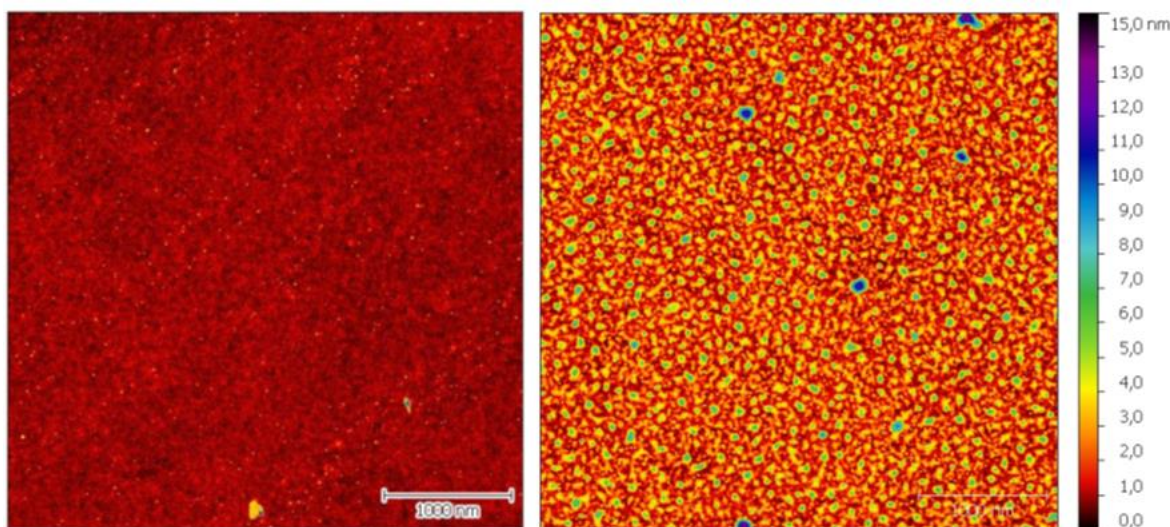
Ultratenké vrstvy byly připravovány ve spolupráci s Ústavem přístrojové techniky AV ČR. Bylo vytvořeno postupně několik sad vzorků a to pomocí radiofrekvenční magnetronové naprašovačky Leybold Z550.

Pro depoziční byla použita 150 mm wolframová katoda o čistotě 99,95%. Depoziční tlak argonu byl udržován na hodnotě 165 mPa pomocí membránového vakuometru Baraton. Výkon magnetronu byl nastaven na 150 W. Vzdálenost mezi držákem substrátu a terčem byla 48 mm. Substrát rotoval pod magnetronem rychlostí 2725 otáček za minutu po dobu 8 sekund, kdy byla vytvořena vrstva přibližně 0,3 nm. Tato hodnota byla spočítána pomocí Taylor-Hobsonova profilometru po změření 200 průchodů pod magnetronem. První testovací vzorek měl naměřenou průměrnou tloušťku 62,7 nm a druhý testovací vzorek 64,9 nm. Takto byly vytvořeny vrstvy o nominální tloušťce 0,3 nm až 3 nm wolframu s krokem 0,3 nm. Jako substrát byl zvolen čištěný křemík, křemík s 200 nm vrstvou termického oxidu křemičitého a slída.

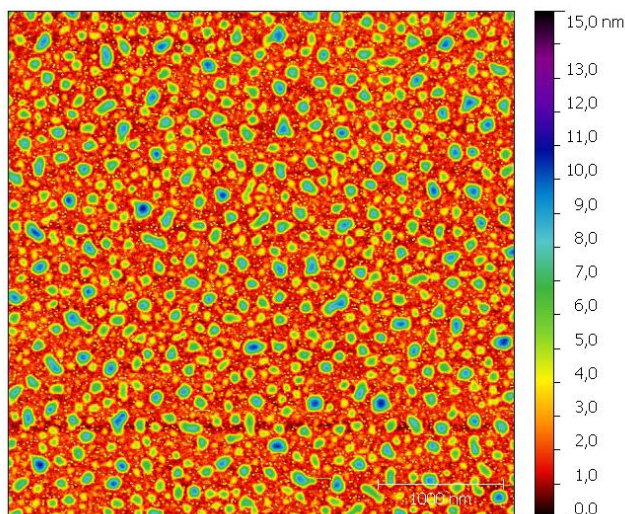
3.2 TOPOGRAFIE

První pokusné vzorky byly zobrazeny pomocí AFM v laboratořích Fyzikálního ústavu AV ČR a to na mikroskopu Bruker Dimension ICON. Byla použita křemíková sonda Multi78Al o velikosti $225 \times 28 \mu\text{m}$, s tuhostí 3 N/m , rezonanční frekvence 75 kHz s poloměrem hrotu méně než 10 nm . Byly vybrány různá místa na skenování o velikosti $4 \times 4 \mu\text{m}$. Ke zpracování map topografie byl použit software Gwyddion [23].

Nejprve byl zobrazený křemíkový substrát jako referenční měření a následovalo zobrazení vzorků s nanosenou vrstvou wolframu.



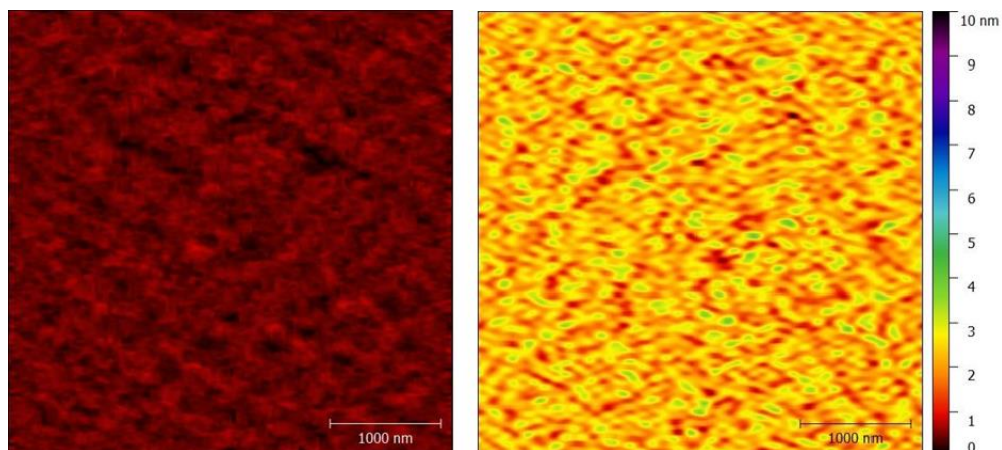
Obrázek 1.: Křemíkový substrát (vlevo) a křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce $0,3 \text{ nm}$ – AFM



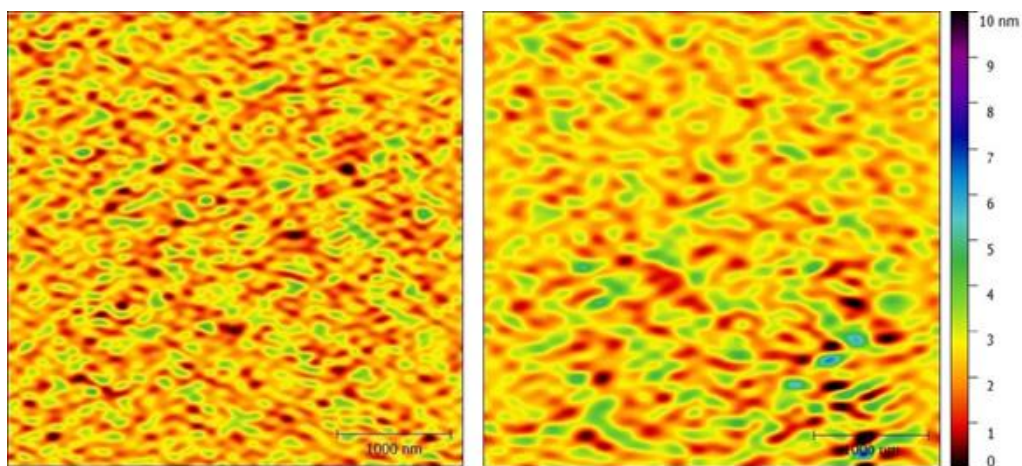
Obrázek 2.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce $0,6 \text{ nm}$ – AFM

Celá finální sada vzorků byla zobrazena pomocí Agilent Technologies 5420 SPM/AFM v laboratořích FAI UTB. Byla použita křemíková sonda AAC o velikosti $225 \times 38 \mu\text{m}$, s nominální tuhostí 48 N/m , nominální rezonanční frekvence 190 kHz s poloměrem hrotu méně než 10 nm .

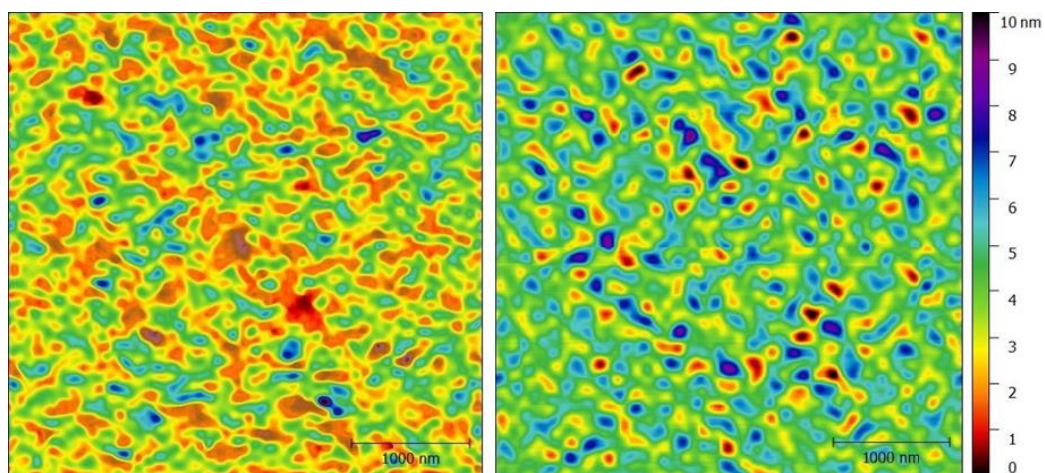
Byly vybrány různá místa na skenování o velikosti 4 x 4 μm . Ke zpracování map topografie byl použit software Gwyddion [23].



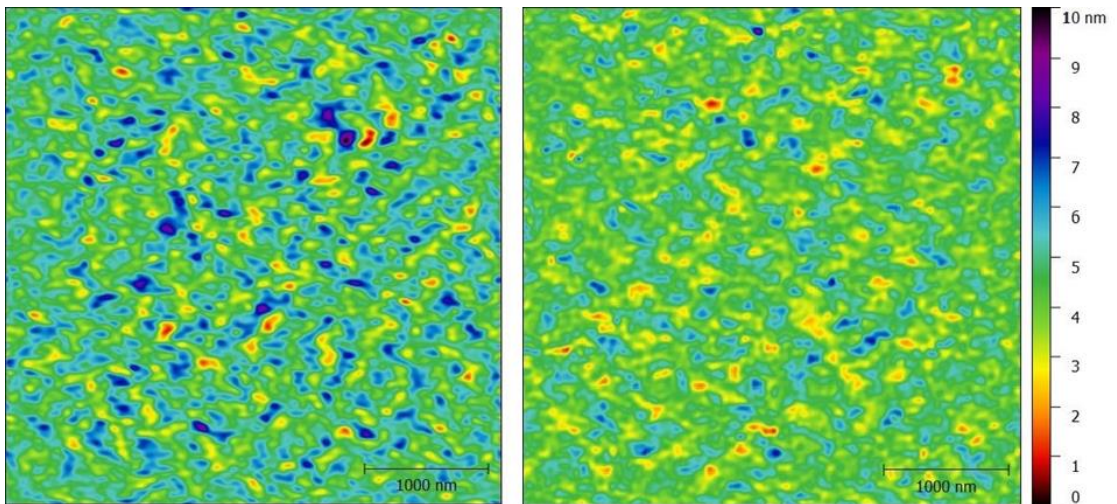
Obrázek 3.: Referenční vzorek křemíku (vlevo) a křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 0,3 nm



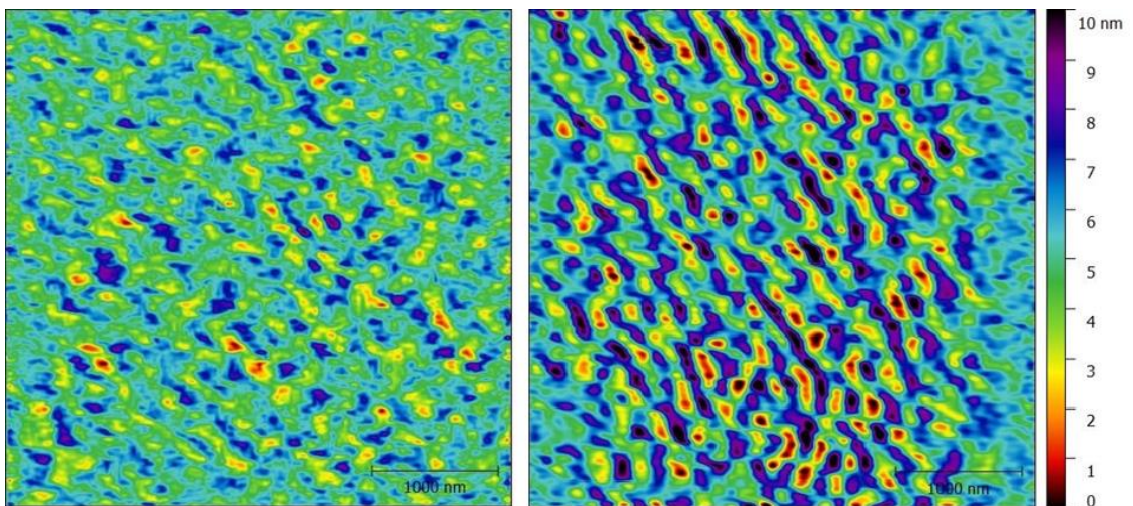
Obrázek 4.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 0,6 nm (vlevo) a 0,9 nm



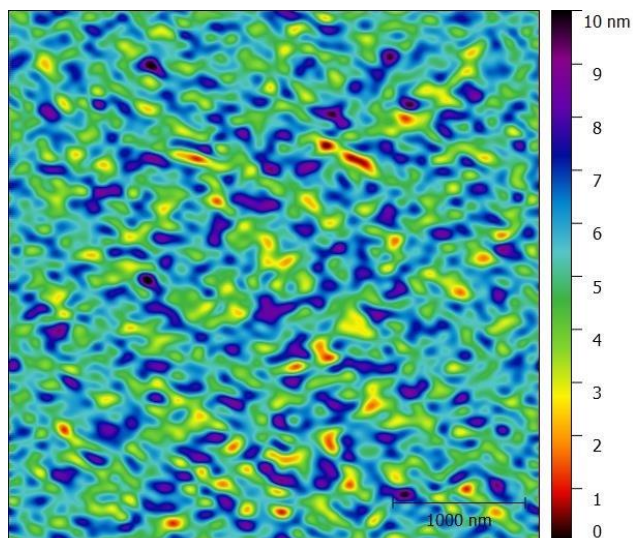
Obrázek 5.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 1,2 nm (vlevo) a 1,5 nm



Obrázek 6.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 1,8 nm (vlevo) a 2,1 nm



Obrázek 7.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 2,4 nm (vlevo) a 2,7 nm



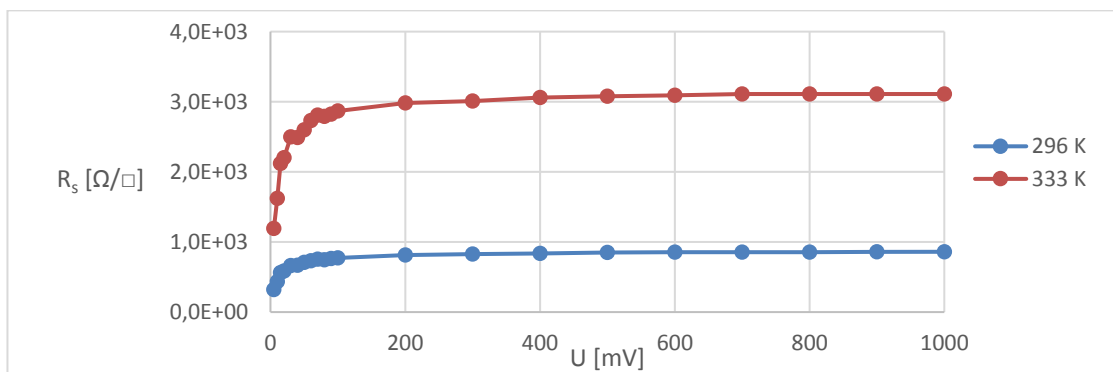
Obrázek 8.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 3,0 nm

Výsledky získané ze sad vzorků změřených v laboratořích Fyzikálního ústavu AV ČR nejsou plně korespondující s výsledky získanými z kompletní sady vzorků v laboratořích FAI UTB. Struktura zhruba odpovídá, ale jsou zde patrné rozdíly. Tyto rozdíly mohou být přisuzovány rozdílným umístěním substrátu v naprašovací komoře [24][25] a obecně i obtížnosti dosažení uniformity vrstev pomocí naprašovacích depozičních technik.

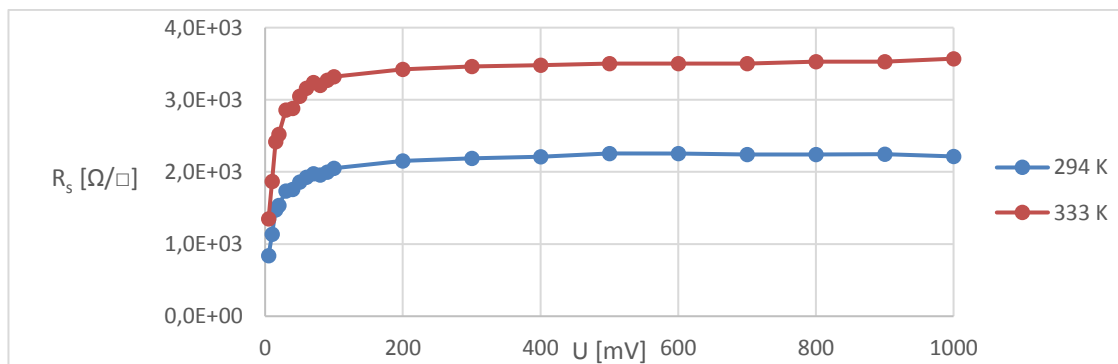
3.3 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI

Z perkolační teorie vyplývá, že dochází u tenkých vrstev k fázovému přechodu vodivosti. Proto bylo pomocí elektrometru Keithley 6517A, který je určen pro měření velmi malých proudů, provedeno měření stejnosměrného povrchového odporu pro určení prahu perkolace. Pomocí tohoto přístroje byl změřen elektrický proud protékající vzorkem při stálém napětí a z něj vypočítán elektrický povrchový odpor vzorku. Každý bod grafu představuje 100 naměřených hodnot, které byly zprůměrovány.

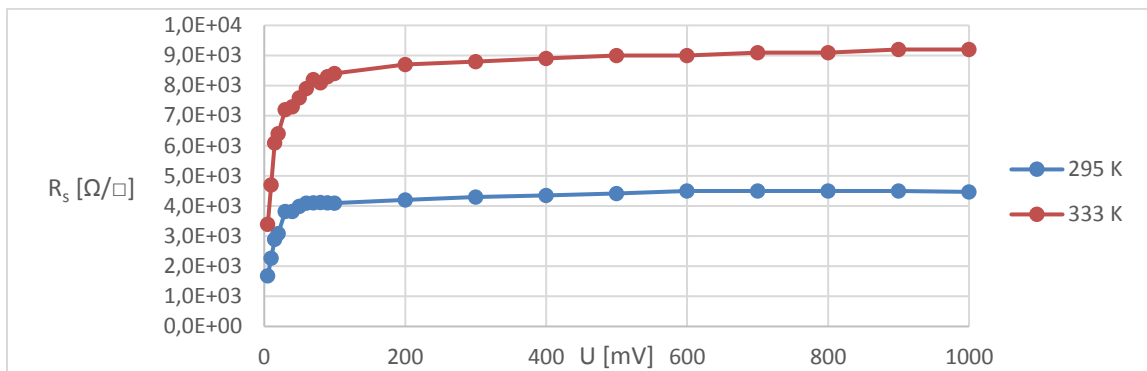
Tato měření byla provedena v laboratorní peci Memmert UNP 200, která sloužila k odstínění vnějšího elektromagnetického rušení, při pokojové teplotě (≈ 295 K) a při teplotě 333 K. Na měřicích sondách byla použita silikonová pryž plněná sazemí o vysoké elektrické vodivosti. Rezistance tohoto materiálu byla řádově menší ($\approx 350 \Omega$) ve srovnání s naměřenými hodnotami, které jsou uvedeny v grafech.



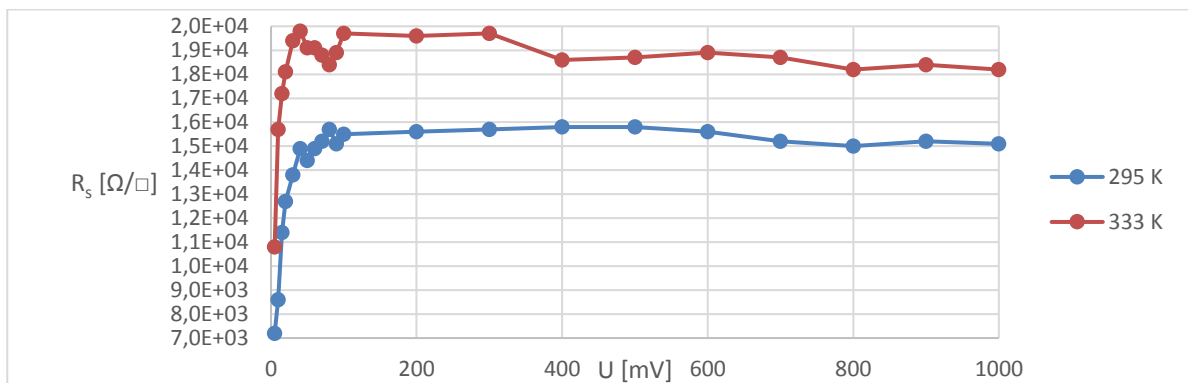
Obrázek 9.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 3 nm



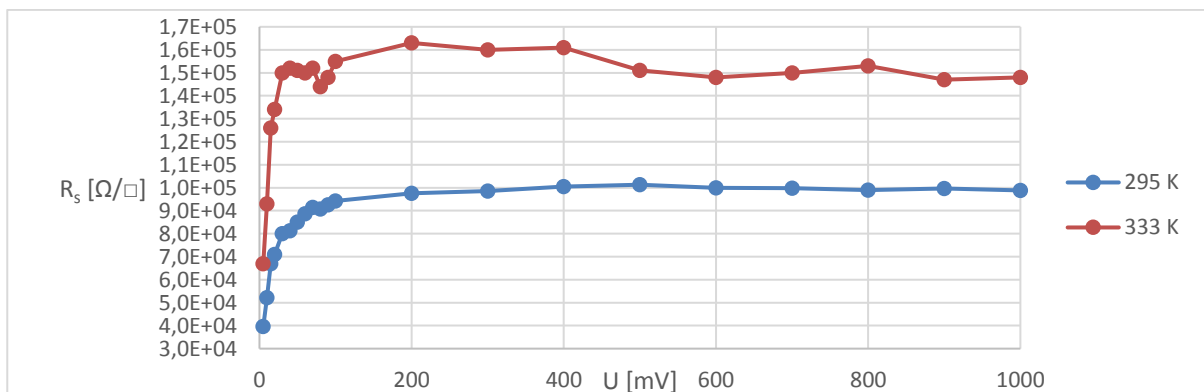
Obrázek 10.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 2,7 nm



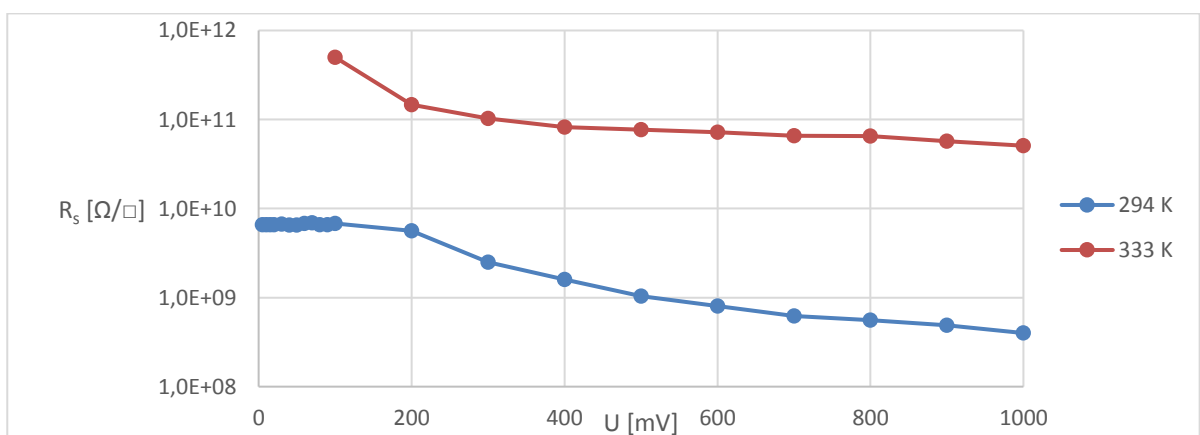
Obrázek 11.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 2,4 nm



Obrázek 12.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 2,1 nm



Obrázek 13.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 1,8 nm



Obrázek 14.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 1,5 nm

Relativní chyba měření se pohybovala pod 5 % u vrstev s nominální tloušťkou nad 1,5 nm. Vrstva s nominální tloušťkou 1,5 nm byla obtížně měřitelná z důvodu velkých fluktuací proudu. Relativní chyba měření byla odhadnuta na 40 %.

Vrstvy s nominální tloušťkou pod 1,5 nm byly neměřitelné. Přístroj nebyl schopen změřit procházející proud. Hodnoty proudu se měnily v průběhu měření při konstantním elektrickém napětí i o několik řádů nebo přístroj ukazoval, že jsou měřené hodnoty mimo jeho měřicí rozsah (pod 0,1 pA).

Při nárůstu teploty došlo k nárůstu elektrického odporu, což je typická charakteristika kovů. Z naměřených dat byl vypočítán teplotní součinitel elektrického odporu $\alpha = 0,028 \text{ K}^{-1}$ (platí v rozsahu 295 až 333 K, tabulková hodnota teplotního součinitele elektrického odporu pro objemový wolfram je $0,0044 \text{ K}^{-1}$) podle:

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta t}$$

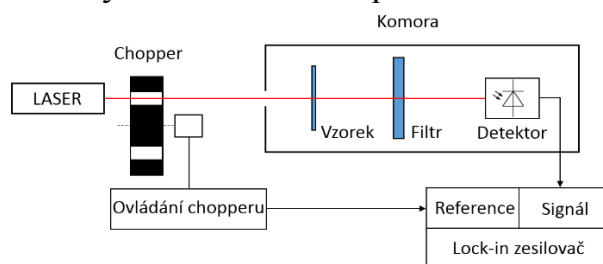
kde α je teplotní součinitel elektrického odporu, ΔR je změna elektrického odporu, R_0 je odpor při počáteční teplotě a Δt je změna teploty.

3.4 OPTICKÉ VLASTNOSTI

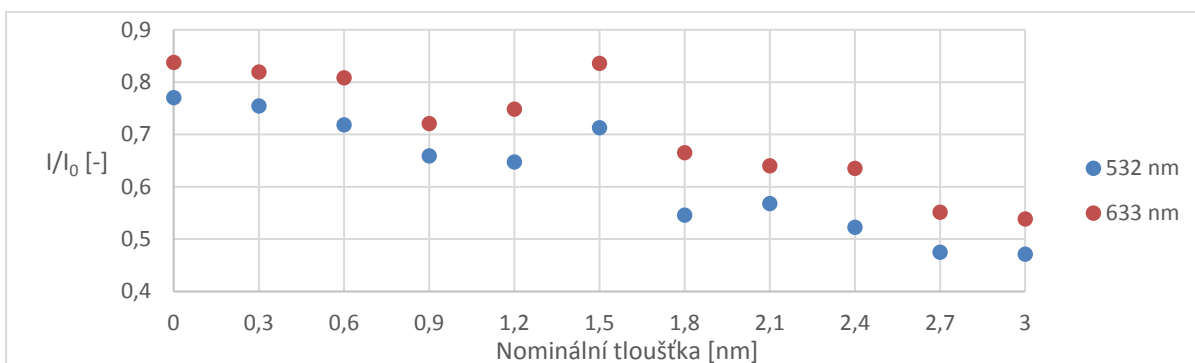
Optické vlastnosti kovů jsou obvykle studovány pomocí experimentů využívajících odrazu světla. Ovšem tenké kovové vrstvy jsou současně částečně průhledné i vodivé (komplexní index lomu, blízkost plazmové frekvence), což umožňuje měření transmitance a absorbance. Nejzajímavější změny bývají pozorovány při kritické tloušťce vrstvy – přechod mezi ostrůvkovou strukturou a souvislou vrstvou. [26] Měření optických vlastností bylo provedeno na vrstvách deponovaných na V1 slídě. Velikou výhodou je rychlost a snadná příprava vzorků při měření optickými metodami.

3.4.1 Optická propustnost

Bylo provedeno měření optické propustnosti pomocí laserů o vlnových délkách 532 nm (Nd:YAG, Suwtech DPGL-3020F) a 633 nm (He-Ne, JDS Uniphase 1125P). Lock-in zesilovač (Stanford Research System SR830 DSP) byl nastaven na frekvenci otáčení optického chopperu. V optické komoře byl dále umístěn filtr pro snížení intenzity světla dopadajícího na fotodiodu. Signál z fotodiody byl přiveden na lock-in zesilovač. Každé měření bylo provedeno dvacetkrát na pěti různých místech vzorku a výsledná hodnota zprůměrována.



Obrázek 15.: Schéma měření optické propustnosti

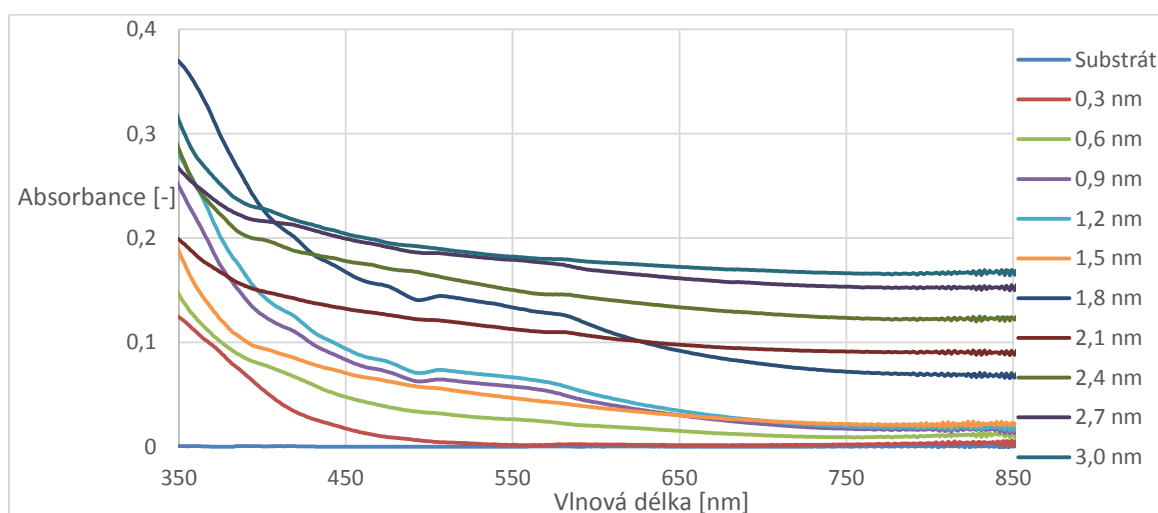


Obrázek 16.: Závislost transmittance na nominální tloušťce

Relativní chyba při měření transmittance byla pod 1 %. Pro nominální tloušťku vzorku 1,2 až 1,8 nm lze pozorovat změnu chování transmittance. Lze tedy předpokládat, že v této oblasti je dosaženo kritické tloušťky – prahu perkolace.

3.4.2 Spektrofotometrie

Dále bylo provedeno měření absorpance na UV/VIS spektrofotometru Lambda 25 od PerkinElmer pro vlnové délky od 350 do 850 nm.

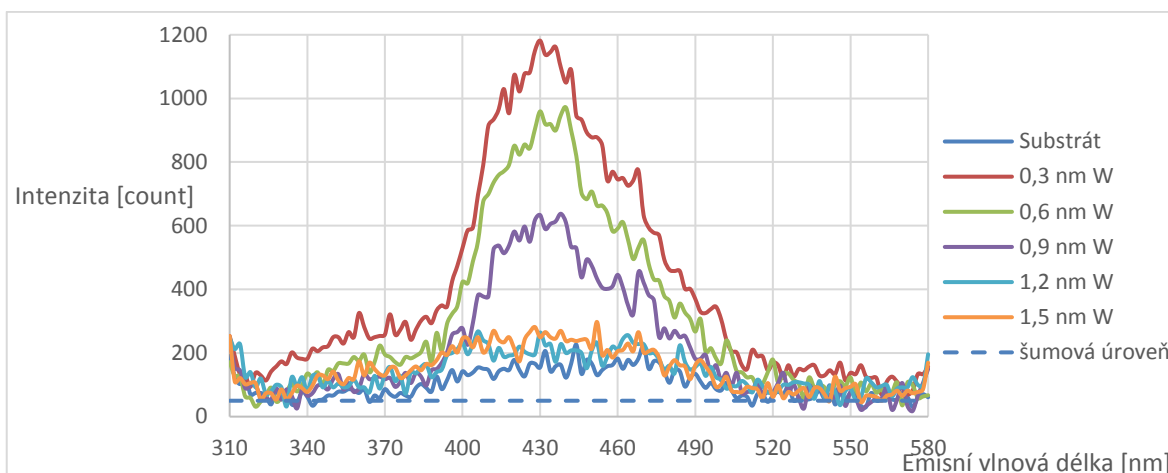


Obrázek 17.: Závislost absorpance na vlnové délce

Vzorky můžeme rozdělit do dvou skupin a to do 1,5 nm a nad 1,8 nm, kdy právě tyto hraniční vzorky vykazují zajímavé chování. Vzorek 1,5 nm má nižší absorpaci ve srovnání se vzorkem 1,2 nm v téměř celém měřeném spektru. Vzorek 1,8 nm má vyšší absorpaci než 2,1 nm do přibližně 620 nm.

3.4.3 Luminiscenční spektroskopie

Neměřitelnost elektrické vodivosti vrstev pod 1,5 nm vedla k hledání další metody pro určení prahu perkolace, respektive pro omezení jeho spodní hranice. Touto metodou byla právě luminiscenční spektroskopie.



Obrázek 18.: Luminiscenční spektra W na slídě při pokojové teplotě. $\lambda_{ex}=300$ nm

Při měření na spektrofluorimetru PC1 od ISS při pokojové teplotě se objevily luminiscenční vlastnosti u vrstev s nominální tloušťkou 0,3 až 0,9 nm. Mírná luminiscence se objevila i u vrstev 1,2 a 1,5 nm. Z grafu luminiscenčních spekter lze pozorovat nejen zmenšování intenzity luminiscence mezi jednotlivými vzorky, ale také zužování šířky luminiscenčního spektra. Vrstvy nad 1,5 nevykazovaly žádnou luminiscenci. Lze tedy předpokládat, že se práh perkolace nachází nad vrstvou s nominální tloušťkou 1,5 nm.

V publikacích se objevují luminiscenční vlastnosti WO_3 vrstev [27][28]. Nicméně kdyby došlo k oxidaci deponované vrstvy, tak by se luminiscence pravděpodobně projevila na celé sérii vzorků.

3.5 PRÁH PERKOLACE

Z předchozích měření se dá odhadnout, kde se nacházejí hranice, mezi nimiž se nachází práh perkolace. Horní hranici představuje měřitelnost povrchové vodivosti, přičemž nejtenčí bezpečně změřitelná vrstva měla nominální tloušťku 1,8 nm. Omezení dolní hranice perkolačního prahu vycházelo z měření optických vlastností. Tato hranice byla stanovena pro vrstvu s nominální tloušťkou 1,5 nm. Z tohoto ohraničení tedy vychází, že se perkolační práh nachází mezi těmito dvěma tloušťkami (tedy v době depozice 40 - 48 s).

Pro výpočet kritické doby depozice t_c a kritického transportního exponentu μ bylo potřeba sestavit rovnice vycházející z:

$$\log R_S = -\mu \log \left(1 - \frac{t_c}{t} \right) + \log c \quad ; \text{ pro } t > t_c$$

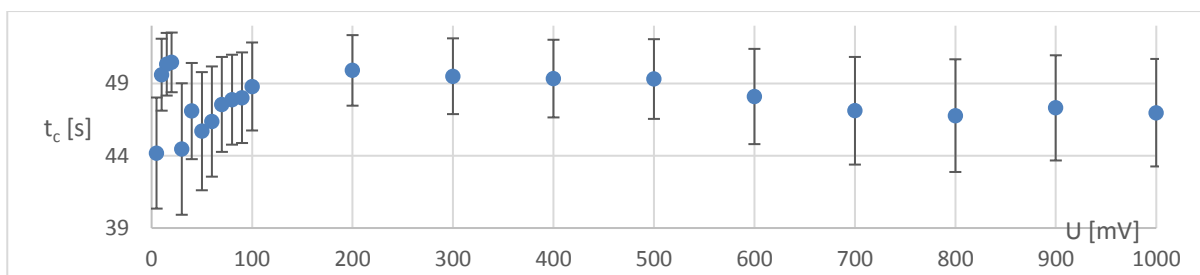
Vytvořením soustavy rovnic a jejich odečtením získáváme soustavu dvou rovnic o dvou neznámých:

$$\log \frac{R_1}{R_2} = \mu \log \left(\frac{1 - \frac{t_c}{t_2}}{1 - \frac{t_c}{t_1}} \right)$$

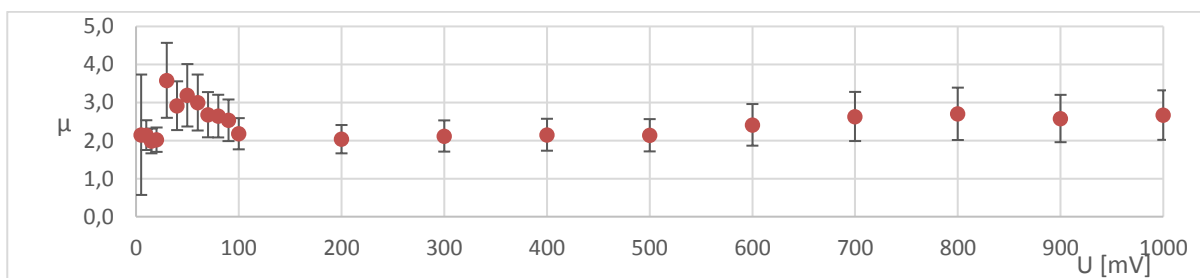
$$\log \frac{R_3}{R_4} = \mu \log \left(\frac{1 - \frac{t_c}{t_4}}{1 - \frac{t_c}{t_3}} \right)$$

Vzhledem k velkému množství naměřených dat, která se dají do těchto rovnic dosadit, byl vytvořen program ve výpočetním a vývojovém prostředí MATLAB. Dva propojené cykly dosazovaly do rovnic všechny možné kombinace pro jednotlivé křivky. K řešení rovnic byla použita funkce *vpasolve*, která slouží k numerickému řešení soustavy rovnic.

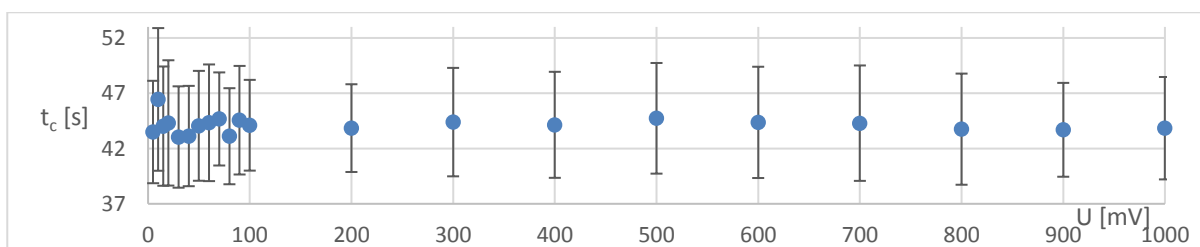
Ze všech řešení (celkem 1890) byly vyfiltrovány smysluplné výsledky a z nich zprůměrovány hodnoty t_c a μ pro jednotlivá napětí.



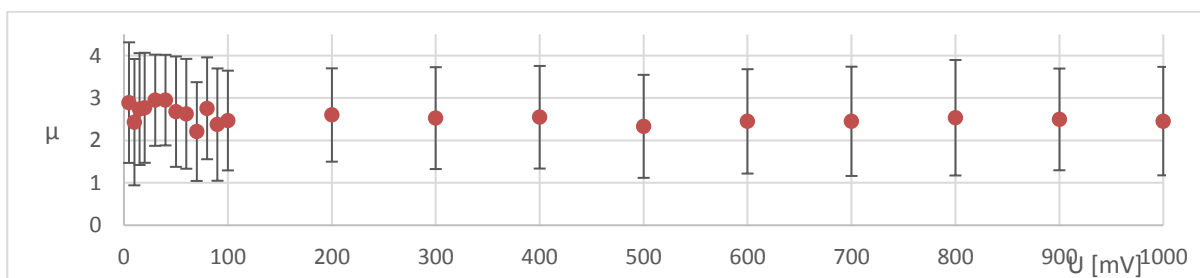
Obrázek 19.: Závislost t_c na napětí při pokojové teplotě



Obrázek 20.: Závislost μ na napětí při pokojové teplotě

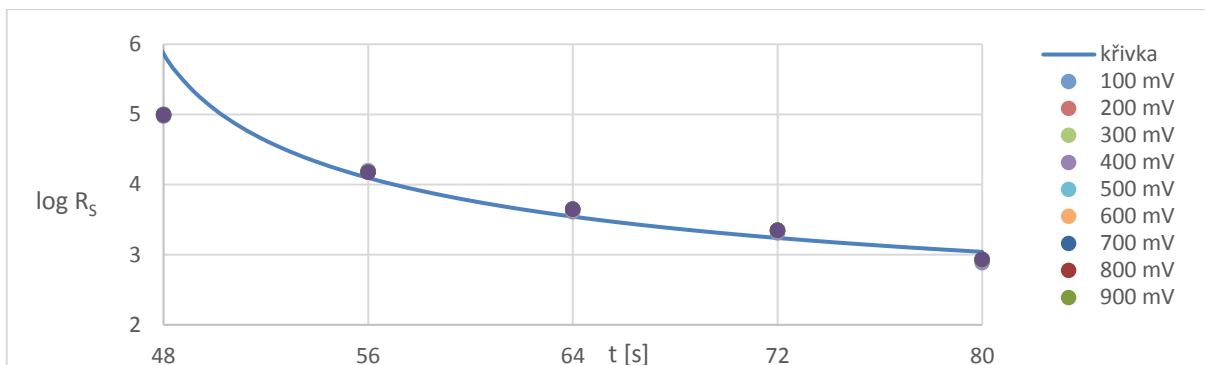


Obrázek 21.: Závislost t_c na napětí při teplotě 333 K

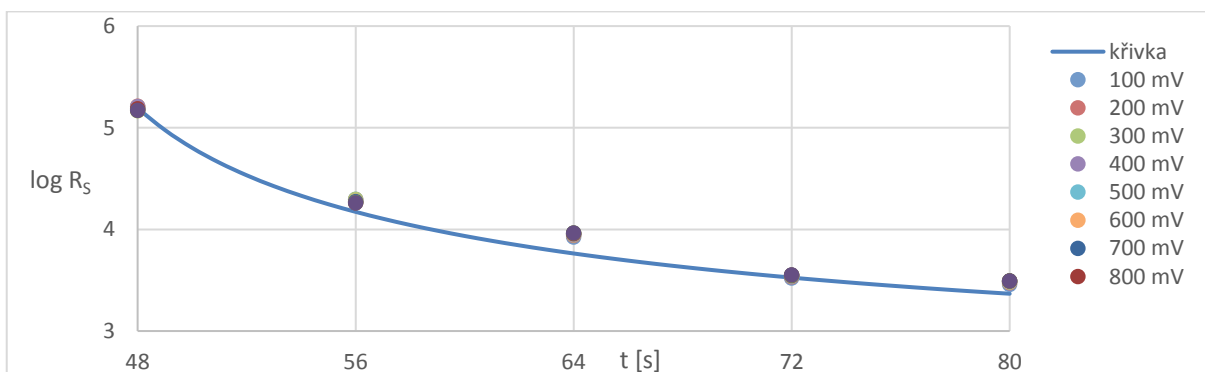


Obrázek 22.: Závislost μ na napětí při teplotě 333 K

Pro napětí do 100 mV se objevují fluktuační, proto byly tyto hodnoty pro určení t_c a μ vynechány. Z ostatních hodnot vyplývá $t_c = (46 \pm 5) \text{ s}$ a $\mu = 2,8 \pm 1,0$ při pokojové teplotě ($\approx 295 \text{ K}$) a při teplotě 333 K byly hodnoty stanoveny na $t_c = (44 \pm 5) \text{ s}$ a $\mu = 2,5 \pm 1,3$



Obrázek 23.: Proložení naměřených dat při pokojové teplotě křivkou ze získaných hodnot t_c a μ



Obrázek 24.: Proložení naměřených dat při teplotě 333 K křivkou ze získaných hodnot t_c a μ

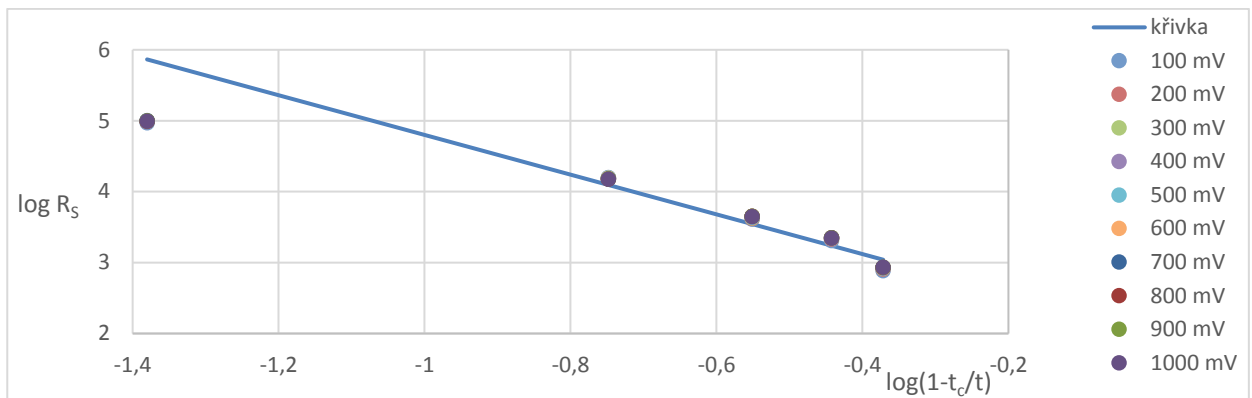
Největší rozdíl mezi vypočítanou křivkou a křivkami naměřenými je v oblasti $t = 48$ až 56 s z důvodu blízkosti hodnot t_c a t (na a pod perkolačním prahem platí jiné koeficienty).

Rozdíly mezi parametry, které byly získány při různých teplotách, jsou statisticky zanedbatelné, vezmeme-li v úvahu nejistotu měření. Průměrná hodnota $t_c = (45 \pm 7) \text{ s}$ odpovídá nominální tloušťce $(1,79 \pm 0,28) \text{ nm}$ wolframu.

Výše uvedené výsledky platí pro celou měřenou oblast, ale perkolační teorie a tedy i průběh konduktance platí pouze v oblasti blízké perkolačnímu prahu, což je zřejmé při zobrazení závislosti $\log R_S$ na $\log \left(1 - \frac{t_c}{t}\right)$ vycházející z:

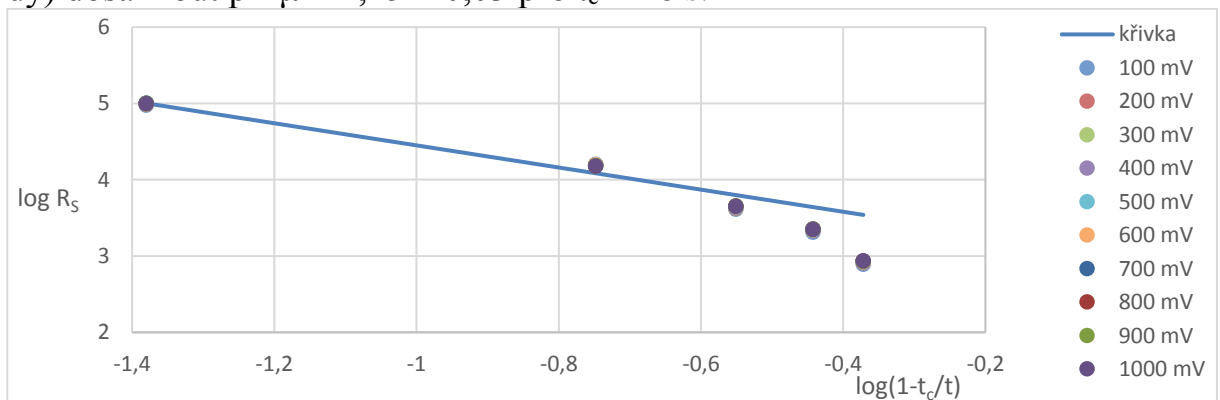
$$\log R_S = -\mu \log \left(1 - \frac{t_c}{t}\right) + \log c$$

kde μ popisuje sklon přímky.



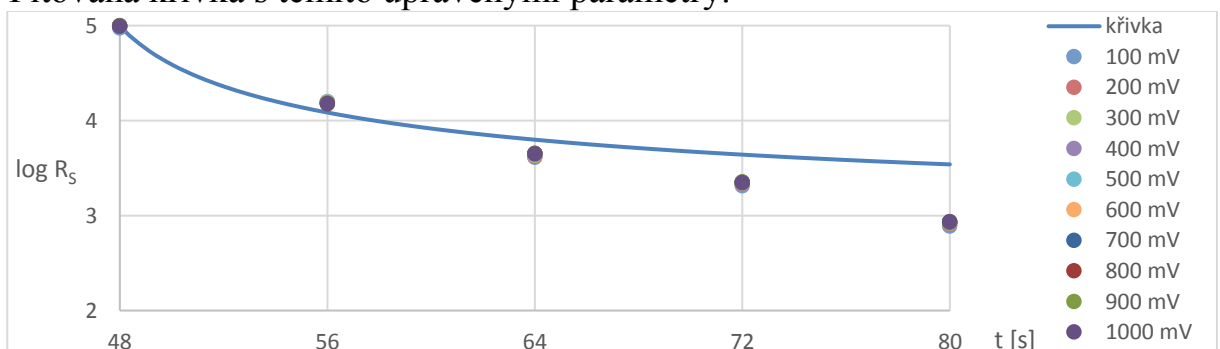
Obrázek 25.: Závislost $\log R_s$ na $\log \left(1 - \frac{t_c}{t}\right)$ při pokojové teplotě s hodnotami platnými pro celou měřenou oblast

Z grafu je zřejmé, že v oblasti blízké t_c fitovaná křivka nesedí, proto bylo potřeba parametry upravit. Nejlepší shody je možné v oblasti blízké t_c (3 nejbližší body) dosáhnout při $\mu = 1,45 \pm 0,03$ pro $t_c = 46$ s.



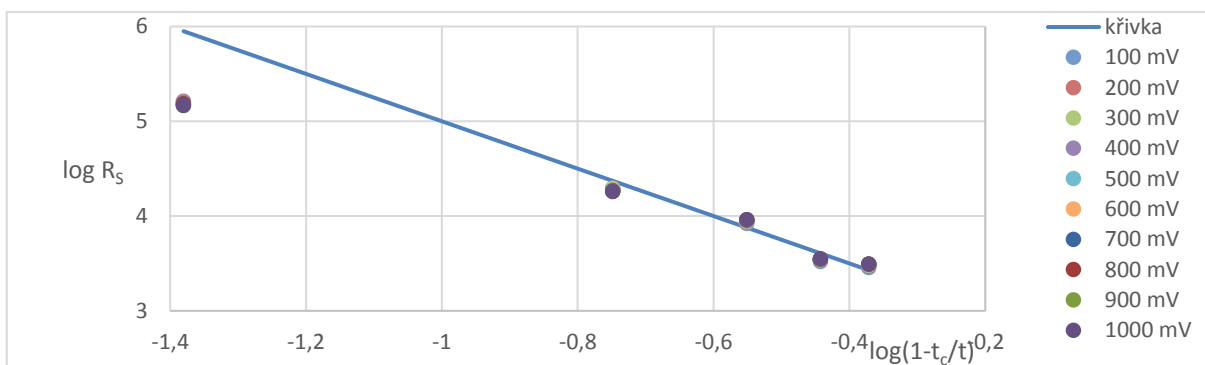
Obrázek 26.: Závislost $\log R_s$ na $\log \left(1 - \frac{t_c}{t}\right)$ při pokojové teplotě s hodnotami platnými pro oblast blízkou t_c

Pro závislost $\log R_s$ na $\log \left(1 - \frac{t_c}{t}\right)$ lze pozorovat lepší shodu v bodech blízkých t_c . Fitovaná křivka s těmito upravenými parametry:



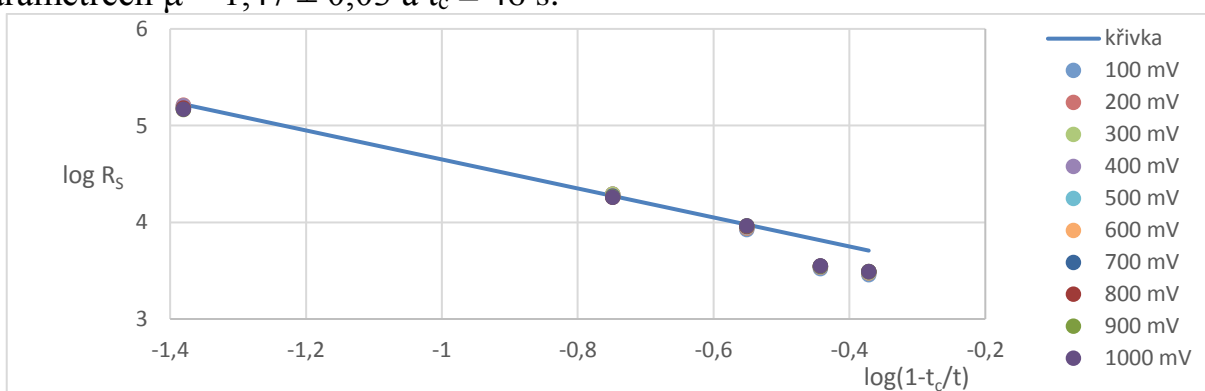
Obrázek 27.: Proložení naměřených dat při pokojové teplotě křivkou ze získaných hodnot t_c a μ po úpravě

Totéž platí i pro výsledky, které byly získány při teplotě 333 K.



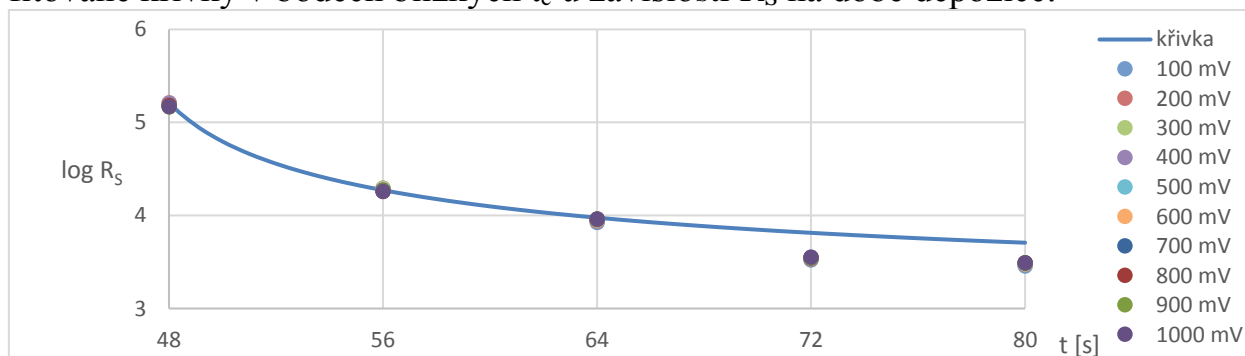
Obrázek 28.: Závislost $\log R_s$ na $\log \left(1 - \frac{t_c}{t}\right)$ při teplotě 333 K s hodnotami platnými pro celou měřenou oblast.

Nejllepší shody je možné v oblasti blízké t_c při teplotě 333 K dosáhnout při parametrech $\mu = 1,47 \pm 0,03$ a $t_c = 46$ s.



Obrázek 29.: Závislost $\log R_s$ na $\log \left(1 - \frac{t_c}{t}\right)$ při teplotě 333 K s hodnotami platnými pro oblast blízkou t_c .

Pro závislost $\log R_s$ na $\log \left(1 - \frac{t_c}{t}\right)$ při teplotě 333 K můžeme pozorovat mnohem lepší shodu v bodech blízkých t_c . Také můžeme pozorovat lepší shodu fitované křivky v bodech blízkých t_c u závislosti R_s na době depozice:



Obrázek 30.: Proložení naměřených dat při teplotě 333 K křivkou ze získaných hodnot t_c a μ po úpravě

Hodnota transportního kritického koeficientu byla v oblasti blízké t_c pro teplotu 333 K stanovena na $\mu = 1,47 \pm 0,03$.

4. DISKUZE

Kritická doba depozice pro ultratenké vrstvy wolframu připravené pomocí radiofrekvenčního magnetronového naprašování byla stanovena pro daný systém na $t_c = (45 \pm 7)$ s. Kritické době depozice $t_c = (45 \pm 7)$ s odpovídá nominální tloušťka $(1,79 \pm 0,28)$ nm wolframové vrstvy. Kritický koeficient byl stanoven na $\mu = 2,8 \pm 1$ respektive $2,5 \pm 1,3$ přes celou měřenou oblast. V případě stanovení kritického koeficientu pouze v oblasti blízké t_c (3 nejbližší vzorky nad prahem perkolace představující zlinealizovanou oblast v blízkosti t_c) byl tento kritický koeficient stanoven na $\mu = 1,45 \pm 0,03$ respektive $\mu = 1,47 \pm 0,03$ při $t_c = 46$ s, přičemž obecně přijímaná hodnota je $\mu = 1,3$. Tyto hodnoty byly stanoveny z experimentálně získaných dat stejnosměrné povrchové vodivosti nad perkolačním prahem (Obr. 9 až 14).

Principiální neměřitelnost stejnosměrné povrchové vodivosti vrstev pod prahem perkolace vedla k hledání dalších podpůrných metod, které by sloužily k jeho určení.

Jednou z těchto metod bylo zobrazení povrchové struktury pomocí AFM, kdy lze pozorovat rozložení deponovaných struktur na povrchu substrátu a jejich průběžný růst (Obr. 1 až 8). Tato metoda poskytuje nejvíc informací v prvotních fázích růstu vrstvy, kdy lze ještě bezpečně určit, kde se nachází substrát a kde deponovaný materiál (Obr. 1 až 5). V případě delší doby depozice a tím i větších deponovaných struktur, které vzájemně přerůstají, již není možné ze samotného AFM určit, kde se nachází deponovaný kov a kde samotný substrát, nicméně stále tato metoda poskytuje informace a povrchové struktury jako takové.

Další skupinou podpůrných metod byla optická měření. Pro měření optické transmitance byly použity dva lasery o vlnových délkách ve viditelné oblasti (532 a 633 nm, Obr. 15). Tyto lasery byly zvoleny z důvodu, že jejich frekvence se s největší pravděpodobností nachází pod plazmovou frekvencí deponovaných vrstev a tudíž bude možné změřit změny v transmitanci způsobené částečným odrazem laserového paprsku. Jelikož se tento jev při měření transmitance projevil (Obr. 16), bylo také provedeno měření absorpance ve viditelné oblasti (350 až 750 nm), kdy lze pozorovat zajímavý průběh spekter a jejich vztahy mezi jednotlivými vzorky s různou dobou depozice respektive s různou nominální tloušťkou deponované vrstvy (Obr. 17). Další podpůrnou metodou bylo měření luminiscence, která se projevila u vrstev s nejmenší nominální tloušťkou (Obr. 18) respektive u vzorků, u kterých byly u AFM měření pozorovány izolované shluky deponovaného materiálu (klastry). Intenzita stejně jako šířka luminiscenčního spektra se zmenšovala se zvětšující se velikostí klastrů. U vzorků s nominální tloušťkou deponované vrstvy, která se blížila nebo byla větší, než byla odpovídající tloušťka u perkolačního prahu, se luminiscence neprojevila vůbec (nebo byla pod šumovou úrovní měřicího přístroje).

Z výpočtů založených na měření stejnosměrné povrchové vodivosti (Obr. 19 až 30) a z výsledků z dalších zvolených podpůrných metod lze tedy konstatovat, že perkolační práh odpovídá vrstvě o nominální tloušťce $(1,79 \pm 0,28)$ nm.

Pro určování perkolačního práhu u tenkých kovových vrstev existuje poměrně omezené množství prací, přestože se jedná o fundamentální problém pro následné aplikace těchto vrstev.

Z obdobných studií, které se zabývají problematikou určování kritických exponentů respektive stanovení perkolačního práhu tenkých kovových vrstev, lze zmínit autory Liang et al. [29], kteří připravili různé materiály na SiO_2 s výsledkem $\mu = 1,15$. Papandreou a Nédellec [30] připravili Pd vrstvy o tloušťce okolo 10 nm nanesené pomocí odpařování elektronovým svazkem na substrát NaCl s 15 nm SiO_2 s výsledkem $\mu = 1,3$. Kapitulnik a Deutscher [31] připravili Al-Ge vrstvy pomocí odpařování na sklo s výsledkem $\mu = 2,1 \pm 0,5$ pro silné vrstvy (do 400 nm) a $\mu = 0,9 \pm 0,25$ pro vrstvy tenké (nad 60 nm). Oates et al. [32] připravili Ti vrstvy o tloušťce 2 až 17 nm pomocí naprašování a určili perkolační práh pro tloušťku $(3,3 \pm 0,1)$ nm. Hověl et al. [33] připravili Au vrstvy o tloušťce 3 až 10 nm na křemíku s 200 nm SiO_2 a určili perkolační práh pro tloušťku $(6,5 \pm 0,1)$ nm.

Tato práce je zajímavá v tom, že je zaměřena na určení perkolačního práhu pro vrstvy ultratenké a zobrazení jejich povrchové struktury a postupného růstu.

5. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Problematikou určení perkolačního práhu z výsledků měření elektrické povrchové vodivosti se v minulosti zabývalo hodně pracovišť, tudíž se publikací v literatuře objevuje velké množství. Všechny tyto práce se věnují makroskopickým systémům, kde je mechanismus vzniku elektricky vodivé cesty přes vzorek materiálu celkem zřejmý. Studie se zabývají 2D systémy, což je vlastně vodivá deska, nebo 3D systémy, což je obvykle kompozitní materiál, který se skládá z nevodivé matrice a vodivých příměsí. Z těchto experimentů a myšlenkových pokusů plynou obecné matematické modely, které se uvádějí ve většině knih, které byly o tomto jevu publikovány. Již z těchto celkem jednoduchých modelů plyne silná závislost práhu perkolace na tvaru vodivých příměsí, na struktuře jejich uložení a samozřejmě na objemovém zlomku plniva. Odtud také plynou odhady kritických exponentů, kterých se i my v této práci držíme.

Historicky vznikly uvedené výsledky v době, kdy pojmy jako mezoskopická fyzika či nanotechnologie byly pouze teoretickými spekulacemi bez experimentálně podložených údajů. V současné době obrovského rozvoje nanotechnologických aplikací se opět ke studiu procesů a dějů v oblasti práhu perkolace vracíme s pochopitelnými praktickými požadavky, které vychází z potřeb konstruovaných systémů či součástek. Zde se ovšem již experimentální

data získávají obtížně a publikací v současné době není mnoho. Většina z nich je založena na ideálních perkolačních modelech případně simulacích.

V oblasti ultratenkých vrstev jsou přenosy nosičů náboje složitými jevy nutně založenými na kvantově mechanickém popisu. Také příprava vzorků se komplikuje, přičemž podstatnou podmínkou je jejich reprodukovatelnost, což v oblasti blíží se velikosti atomů a molekul je problémem. Diagnostika takto vytvořených vrstev je složitým technologickým procesem. Již stanovení základní veličiny při tvorbě ultratenkých vrstev, což je tloušťka, je docela složitý problém, který se zjednodušuje zavedením pojmu nominální tloušťka, což je technologicky rozumné číslo, které nám ale o struktuře vrstvy zase tak mnoho neřekne.

V literatuře uvedené hodnoty prahu perkolace jsou rozdílné pro různé deponované materiály, substráty ale i pro různé použité technologie tvorby těchto vrstev. Proto je zjištění odhadu tloušťky vrstvy nutné pro vytvoření prahu perkolace zajímavé z vědeckého pohledu a zde si myslíme, že je předložená práce přínosem. Je nutno ovšem poznamenat, že práh perkolace je situace, kdy vznikne první vodivá cesta z jedné makroskopické elektrody na druhou. Vrstva není ani homogenní ani celistvá. Teprve dalším přidáváním atomů se vyplňuje. V této situaci asi není vhodné hovořit o dimenzi problému. Jedná se o systém dvojrozměrný, trojrozměrný nebo se jedná o systém s neceločíselnou dimenzí? Proto i určení příslušných kritických exponentů je důležitý vědecký výsledek.

Přínos pro praxi je odtud plynoucí. Pro vytváření senzorických vrstev potřebujeme jistou porezitu připravované vrstvy (větší plocha povrchu), pro tvorbu ochranné vrstvy zase naopak homogenní vrstvu, stejně jako pro přípravu RTG optických vrstevnatých systémů, které na Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně již léta připravují. Pro toto pracoviště jsou naše výsledky užitečné. Tato práce určuje elektrický práh perkolace z výsledků měření, respektive minimální nominální tloušťku wolframové vrstvy, kdy dochází k fázovému přechodu z elektricky nevodivé vrstvy na vrstvu elektricky vodivou v makroskopické oblasti. Právě zajištění této minimální tloušťky je základní předpoklad pro další práci s těmito vrstvami ať už pro aplikace v sensorice, RTG optice nebo v oblasti bezpečnostních značek vytvořených pomocí litografických metod. Perkolační práh byl stanovený pro radiofrekvenční magnetronovou naprašovačku Leybold Z550 s kritickou dobu depozice $t_c = (45 \pm 7)$, což odpovídá vrstvě wolframu o nominální tloušťce $(1,79 \pm 0,28)$ nm (tyto hodnoty jsou platné pro parametry depozice uvedené v experimentální části).

6. ZÁVĚR

Tato práce je zaměřena na vývoj diagnostických metod pro určení elektrického perkolačního prahu ultratenkých wolframových vrstev.

V experimentální části jsou shrnuty vybrané výsledky a to zejména topografické mapy získané pomocí mikroskopie atomárních sil, měření voltampérových charakteristik s následným výpočtem elektrické povrchové

rezistance vrstev v závislosti na době depozice a teplotě, optická transmise, spektra z UV/VIS spektrofotometrie a v neposlední řadě luminiscenční spektra.

Právě z výsledků, které byly získány pomocí optických metod (luminiscence, optické transmise a absorpance) a měřením povrchové rezistance, byl omezen pravděpodobný rozsah, ve kterém se nachází elektrický perkolační práh. Z těchto naměřených dat byl vypočítán transportní kritický exponent pro celou měřenou oblast $\mu = 2,8 \pm 1$ respektive $2,5 \pm 1,3$ a hlavně čas kritické depozice vztažený na systém, na kterém byly vrstvy připraveny s výsledkem $t_c = (46 \pm 5)$ s pro teplotu 295 K respektive $t_c = (44 \pm 5)$ s pro teplotu 333 K. Doba kritické depozice pro překročení prahu perkolace byla stanovena na $t_c = (45 \pm 7)$ s. **Z této hodnoty byla vypočítána nominální tloušťka wolframové vrstvy odpovídající perkolačnímu prahu ($1,79 \pm 0,28$) nm**, při které dojde k překročení elektrického perkolačního prahu a vrstva se začne jevit jako elektricky vodivá a začne vykazovat kovové vlastnosti. **Transportní kritický koeficient v oblasti blízké t_c** (3 vzorky nad prahem perkolace nacházející se ve zlinearizované oblasti) **byl stanoven na $\mu = 1,45 \pm 0,03$ respektive $\mu = 1,47 \pm 0,03$** (platí pro $t_c = 46$ s).

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] D. S. Ghosh, *Ultrathin Metal Transparent Electrodes for the Optoelectronics Industry*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-00348-1_2. 2013.
- [2] I. Fernandez, X. Borris and F. Pérez-Murano, Atomic force microscopy local oxidation of silicon nitride thin films for mask fabrication, *Nanotechnology*, 16(11), pp. 2731–2737, ISSN 0957-4484. Nov. 2005.
- [3] N. Bornemann, N. H. Sauer, E. Dörsam, Gravure printed ultrathin layers of small-molecule semiconductors on glass, *Journal of Imaging Science and Technology*, 55(4), July 2011, pp. 402011-402018, ISSN 1062-3701.
- [4] T. Pauporte, D. Lincot, Electrodeposition of semiconductors for optoelectronic devices: results of zinc oxide, *Electrochimica Acta*, 45(20), pp. 3345-3353, ISSN 0013-4686, 2000.
- [5] H. Yonezu, Y. Furukawa and A. Wakahara, III–V epitaxy on Si for photonics applications, *Journal of Crystal Growth*, 310(23), pp 4757-4762, 2008.
- [6] M. Akabori, V. A. Guzenko, T. Schäpers and H. Hardtdegen, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ selective area metal-organic vapor phase epitaxy for non-magnetic semiconductor spintronics, *Journal of Crystal Growth*, 310(23), pp 4821-4825, 2008.
- [7] Z. Pesina, J. Sopousek and J. Bursik, Mechanical properties of joints created by silver nanoparticles, *Annals of DAAAM for 2012 and Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium*, ISBN 978-3-901509-91-9, ISSN 2304-1382, pp 0139 - 01421, Vienna, Austria, 2012.

- [8] A. Stierle, F. Renner, R. Streitl, H. Dosch, W. Drube and B. C. Cowie, X-ray Diffraction Study of the Ultrathin Al₂O₃ Layer on NiAl(110), *Science*, Vol. 303, Issue 5664, pp. 1652-1656, ISSN 0036-8075, 2004.
- [9] R. A. Bennett, J. S. Mulley, M. A. Newton and M. Surman, Spectroscopy of ultrathin epitaxial rutile Ti O₂ (110) films grown on W(100), *Journal of Chemical Physics*, 127(8), article no. 084707, ISSN 0021-9606, 2007.
- [10] T. P. Niesen and M. R. Guire, Deposition of ceramic thin films at low temperatures from aqueous solutions, *Solid State Ionics*, 151(1-4), pp. 61-68, ISSN 0167-2738, 2000.
- [11] E. Kondoh, Deposition of Ru thin films from supercritical carbon dioxide fluids, *Japanese Journal of Applied Physics*, 44(7B), pp. 5799-5802, ISSN 0021-4922, 2005.
- [12] S. M. Rosnagel, Thin film deposition with physical vapor deposition and related technologies, *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*, 21(5), pp. S74-S87, ISSN 0734-2101, 2003.
- [13] L. Meda and E. E. Maxie, Lipon thin films grown by plasma-enhanced metalorganic chemical vapor deposition in a N₂-H₂-Ar gas mixture, *Thin solid films*, 520(6), pp. 1799-1803, ISSN 0040-6090, 2012.
- [14] Z. Wang, X. Cheng, J. Zhu, Q. Huang, Z. Zhang and L. Chen, Investigation of aperiodic W/C multi-layer mirror for X-ray optics, *Thin Solid Films*, 519(20), 2011, pp. 6712-6715, ISSN 0040-6090.
- [15] Ch. Morawe, P. Pecci, J. Ch. Peffen and E. Ziegler, Design and performace of graded multilayers as focusing elements for x-ray optics, *Review of Scientific Instruments*. 70(8), pp. 3227-3232, DOI: 10.1063/1.1149897, 1999.
- [16] F. Uhlén et al., Damage investigation on tungsten and diamond diffractive optics at a hard x-ray free-electron laser, *Optics express*, 21(7). 2013.
- [17] Ch. Lie, R. Conley, A. T. Macrander, J. Maser, H. C. Kang and G. B. Stephenson, A multilayer nanostructure for linear zone-plate applications, *Thin Solid Films*, 515(2), 2006, pp. 654-657. ISSN 0040-6090.
- [18] P. Hoghoj, E. Ziegler, J. Susini, A. K. Freund, K. D. Joensen, P. Gorenstein, J. L Wood, Focusing of hard x-rays with W/Si supermirror, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 132. pp. 528-533. 1997
- [19] S. Komatani, K. Nakamachi, K. Nakano, S. Ohzawa, H. Uchihara, A. Bando, K. Tsuji, Fundamental characteristics of hybrid X-ray focusing optics for micro X-ray fluorescence analysis, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 309, pp. 260-263. 2013.
- [20] A. E. Yakshin, I. I. Khodos, I. M. Zhelezniak, A. I. Erko, Fabrication, structure and reflektivty of W/C and W/B₄C multilayers for hard X-ray, *Optics Communications*. 118. pp. 133-142. 1995.

- [21] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva and A. A. Firsov, Electric field in atomically thin carbon films, *Science*, 2004, 306(5696), pp. 666-669. DOI: 10.1126/science.1102896
- [22] A. Kara, H. Enriquez, A. P. Seitsonen, L. C. Lew Yan Voon, S. Vizzini, B. Aufray and H. A. Oughaddou. A review on silicene - New candidate for electronics, *Surface Science Reports*, 2012, 67(1), pp. 1-18. DOI: 10.1016/j.surfrep.2011.10.001
- [23] D. Nečas, P. Klapetek. Gwyddion: an open-source software for SPM data analysis, *Central European Journal of Physics*, 10(1), pp. 181-188, 2012. ISBN: 978-3-527-32743-0
- [24] F. Couzinié-Devy, N. Barreau, J. Kessler. Dependence of ZnO:Al properties on the substrate to target position in RF sputtering. *Thin Solid Films*, 516(20), 2008, pp. 7094-7097, ISSN 0040-6090
- [25] D. Horwat, A. Billard. Effects of substrate position and oxygen gas flow rate on the properties of ZnO:Al films prepared by reactive co-sputtering. *Thin Solid Films*, 515(13), 2007, pp. 5444-5448, ISSN 0040-6090
- [26] A. Axelevitch, B. Gorenstein, G. Golan. Investigation of Optical Transmission in Thin Metal Films. *Physics Procedia*, 32. 2012. pp. 1-13, DOI:10.1016/j.phpro.2012.03.510.
- [27] M. B. Johansson, B. Zietz, G. A. Niklasson, L. Österlund. Optical properties of nanocrystalline WO₃ and WO_{3-x} thin films prepared by DC magnetron sputtering. *Journal of Applied Physics*, 115(21). 2014. DOI: 10.1063/1.4880162.
- [28] V. Madhavi, P. Kondaiah, O. Hussain, S Uthanna. Structural, Optical, and Luminescence Properties of Reactive Magnetron Sputtered Tungsten Oxide Thin Films. *ISRN Optics*. 2012. DOI: 10.5402/2012/801468.
- [29] N. T. Liang, Y. Shan, S.-Y. Wang. Electronic conductivity and percolation theory in aggregated films. *Physical Review Letters*. 37(9). 1976. DOI: 10.1103/PhysRevLett.37.526.
- [30] N. Papandreou, P. Nédellec. Interplay between microscopic and macroscopic disorder in percolation Pd films. *Journal de Physique I*, 2(5). 1992. DOI: 10.1051/jp1:1992175.
- [31] A. Kapitulnik, G. Deutscher. 2D to 3D percolation crossover in the resistivity of co-evaporated Al-Ge mixture films. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 16(12). 1983. DOI: 10.1088/0305-4470/16/12/538
- [32] T. W. H. Oates, D. R. McKenzie, M. M. Bilek. Percolation threshold in ultrathin titanium films determined by in situ spectroscopic ellipsometry. *Physical Review B*, 70(19). 2004. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.195406

[33] M. Hövel, B. Gompf, M. Dressel. Electrodynamics of ultrathin gold films at insulator-to-metal transition. *Thin Solid Films*, 519(9). 2011. DOI: 10.1016/j.tsf.2010.12.041

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.: Křemíkový substrát (vlevo) a křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 0,3 nm – AFM.....	7
Obrázek 2.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 0,6 nm – AFM7	
Obrázek 3.: Referenční vzorek křemíku (vlevo) a křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 0,3 nm	8
Obrázek 4.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 0,6 nm (vlevo) a 0,9 nm.....	8
Obrázek 5.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 1,2 nm (vlevo) a 1,5 nm.....	8
Obrázek 6.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 1,8 nm (vlevo) a 2,1 nm.....	9
Obrázek 7.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 2,4 nm (vlevo) a 2,7 nm.....	9
Obrázek 8.: Křemík s vrstvou wolframu o nominální tloušťce 3,0 nm.....	9
Obrázek 9.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 3 nm.....	10
Obrázek 10.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 2,7 nm.....	10
Obrázek 11.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 2,4 nm.....	11
Obrázek 12.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 2,1 nm.....	11
Obrázek 13.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 1,8 nm.....	11
Obrázek 14.: Povrchový odpor vrstvy s nominální tloušťkou 1,5 nm.....	11
Obrázek 15.: Schéma měření optické propustnosti	12
Obrázek 16.: Závislost transmitance na nominální tloušťce	13
Obrázek 17.: Závislost absorbance na vlnové délce	13
Obrázek 18.: Luminiscenční spektra W na slídě při pokojové teplotě. $\lambda_{ex}=300$ nm.....	14
Obrázek 19.: Závislost t_c na napětí při pokojové teplotě	15
Obrázek 20.: Závislost μ na napětí při pokojové teplotě	15
Obrázek 21.: Závislost t_c na napětí při teplotě 333 K.....	15
Obrázek 22.: Závislost μ na napětí při teplotě 333 K	15
Obrázek 23.: Proložení naměřených dat při pokojové teplotě křivkou ze získaných hodnot t_c a μ	16
Obrázek 24.: Proložení naměřených dat při teplotě 333 K křivkou ze získaných hodnot t_c a μ	16
Obrázek 25.: Závislost $\log R_S$ na $\log 1 - tct$ při pokojové teplotě s hodnotami platnými pro celou měřenou oblast.....	17
Obrázek 26.: Závislost $\log R_S$ na $\log 1 - tct$ při pokojové teplotě s hodnotami platnými pro oblast blízko t_c	17

Obrázek 27.: Proložení naměřených dat při pokojové teplotě křivkou ze získaných hodnot t_c a μ po úpravě.....	17
Obrázek 28.: Závislost $\log R_s$ na $\log 1 - tct$ při teplotě 333 K s hodnotami platnými pro celou měřenou oblast.	18
Obrázek 29.: Závislost $\log R_s$ na $\log 1 - tct$ při teplotě 333 K s hodnotami platnými pro oblast blízko t_c	18
Obrázek 30.: Proložení naměřených dat při teplotě 333 K křivkou ze získaných hodnot t_c a μ po úpravě.....	18

9. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Å	Ångström (10^{-10} m)
RTG	Rentgenové záření
AV ČR	Akademie věd České republiky
FAI	Fakulta aplikované informatiky
UTB	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
AFM	Atomic Force Microscopy – mikroskopie atomárních sil
THz-TDS	Terahertzová spektroskopie v časové doméně
λ	Vlnová délka ($_{ex}$ – excitační, $_{em}$ – emisní)
DC	Stejnoseměrný
T	Teplota
R	Rezistance ($_s$ – povrchová)
t	Čas ($_c$ – kritická doba depozice)
U	Napětí
α	Teplotní součinitel elektrického odporu
I	Intenzita ($_0$ – nominální)
S	Plocha
UV/VIS	Ultraviolet-Visible – ultrafialové-viditelné spektrum
μ	Kritický transportní exponent

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

NAVRÁTIL, M., V. KŘESÁLEK, J. KUDĚLKA, T. MARTÍNEK. Zobrazení polovodičových struktur metodou mikrovlnné skenovací mikroskopie. *Jemná mechanika a optika*, 59 (1), 2014. ISSN 0447-6441.

NAVRÁTIL, M., V. KŘESÁLEK, F. HRUŠKA, T. MARTÍNEK, J. KUDĚLKA, J. SOBOTA. Scanning Probe Microscopy Method for Diagnostics of Ultra-thin Tungsten Films on Silicon Substrate. *18th International Conference*. Santorini Island, Greece, 2014, ISBN 978-1-61804-243-9.

NAVRTAIL, M., V. KŘESÁLEK, J. KUDĚLKA, T. MARTÍNEK. Mikrovlnná skenovací mikroskopie. *Perspektivy elektroniky*, 2014, s. 59-68. ISBN 978-80-260-5776-5.

KUDĚLKA, J., V. KŘESÁLEK, T. MARTÍNEK, M. NAVRÁTIL. Zobrazení magnetického záznamu v IT pomocí mikroskopie magnetických sil. *Jemná mechanika a optika*, 59(10), 2014, ISSN 0447-6441.

NAVRÁTIL, M., V. KŘESÁLEK, F. HRUŠKA, T. MARTÍNEK, J. KUDĚLKA, J. SOBOTA. Diagnostics of Ultra-thin Tungsten Films on Silicon Substrate Using Atomic Force Microscopy. *International Journal of Materials*. 2014. ISSN 2313-0555.

MARTÍNEK, T., J. KUDĚLKA, M. NAVRÁTIL, V. KŘESÁLEK, A. FEJFAR, M. HÝVL, J. SOBOTA. Nanoscale Characterization of Ultra-thin Tungsten Films Deposited by Radio-Frequency Magnetron Sputtering. *15th IEEE International Conference on Nanotechnology*, 2015. Rome, Italy, ISBN 978-1-4673-8156-7.

MARTÍNEK, T., J. KUDĚLKA, M. NAVRÁTIL, V. KŘESÁLEK. Characterization of epitaxial layers using scanning microwave microscopy. *Annals of DAAAM for 2015 and Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Sustainability*, 2015. Zadar, Croatia. ISBN 978-3-902734-06-8.

KUDĚLKA, J., T. MARTÍNEK, M. NAVRÁTIL, V. KŘESÁLEK. Mapping differences in surface elasticity using force modulation microscopy. *Annals of DAAAM for 2015 and Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Sustainability*, 2015. Zadar, Croatia. ISBN 978-3-902734-06-8.

NAVRÁTIL, M., T. MARTÍNEK, J. KUDELKA, V. KŘESÁLEK. Design of scanning system for mechanoscopic analysis. *Annals of DAAAM for 2015 and Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Sustainability*, 2015. Zadar, Croatia. ISBN 978-3-902734-06-8.

MARTÍNEK, T., J. KUDĚLKA, M. NAVRÁTIL, V. KŘESÁLEK. Scanning System for Ballistic Analysis. *Advances in Intelligent Systems and Computing (466). Automation Control Theory Perspectives in Intelligent Systems*. 2016. ISSN 2194-5357. ISBN 978-3-319-33387-8.

MARTÍNEK, T., J. KUDĚLKA, M. NAVRÁTIL, T. FOŘT, V. KŘESÁLEK. Characterization of ultra-thin tungsten layers. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(11), 2016. ISSN 0973-4562.

KUDĚLKA, J., T. MARTÍNEK, M. NAVRÁTIL, V. KŘESÁLEK. Nanosteganography using atomic force microscopy. *16th IEEE International Conference on Nanotechnology*, 2016. Sendai, Japan. ISBN 978-1-5090-3914-2.

KUDĚLKA, J., T. MARTÍNEK, M. NAVRÁTIL, V. KŘESÁLEK. Quality control in microelectronics using scanning microwave microscopy. *21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications*, 2016. Krakow, Poland. ISBN 978-1-5090-2215-1.

KUDĚLKA, J., T. MARTÍNEK, M. NAVRÁTIL, V. KŘESÁLEK. The effect of tip speed in AFM scratching. *International Conference on Information and Digital Technology*, 2016. Rzeszów, Poland. ISBN 978-1-4673-8860-3.

KUDĚLKA, J., T. MARTÍNEK, M. NAVRÁTIL, V. KŘESÁLEK. The effect of scratching direction in AFM nanolithography. *7th International Conference on Information Science and Technology*, 2017. Da Nang, Vietnam. ISBN 978-1-5090-5402-2.

MARTÍNEK, T.. Stanovení podmínek a požadavků pro implementaci prvků biometrické identifikace v zabraňovacích (turniketových) systémech. Výzkumná zpráva. 2017. CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004581 - MODULÁRNÍ SYSTÉM ENTER, UTB ve Zlíně pro COMINFO, a.s.

MARTÍNEK, T.. Obecná doporučení pro testování a ověřování funkcí prototypů zařízení Multifunkční čtecí hlava a odebírače karet Card Collector. Výzkumná zpráva. 2017. CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004581 - MODULÁRNÍ SYSTÉM ENTER, UTB ve Zlíně pro COMINFO, a.s.

KOVÁŘ, S., T. MARTÍNEK, V. MACH, M. POSLÍŠILÍK. Composite Materials to Protect Security Devices Against Electromagnetic Interference. 2017 Progress in Electromagnetic Research Symposium – Fall (PIERS – FALL), 2017. Singapore. DOI: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293546

KOVÁŘ, S., T. MARTÍNEK, J. VALOUCH, M. POSLÍŠILÍK, M. ADÁMEK. Recyclable Materials as Means of Electromagnetic Shielding. 2018 International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), 2018. Waterloo. DOI: 10.1109/ANTEM.2018.8572946

MARTÍNEK, T. Komparativní srovnání bezlicenčních rádiových pásem ISM/SRD z hlediska globální (celosvětové) nebo regionální (region, světadíl, stát,...) použitelnosti. Výzkumná zpráva. 2018. CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004581 - MODULÁRNÍ SYSTÉM ENTER, UTB ve Zlíně pro COMINFO, a.s.

MARTÍNEK, T. Komparativní srovnání bezlicenčních rádiových pásem (ISM/SRD) z hlediska rádiového dosahu, rychlosti přenosu dat, odolnosti proti rušení, zabezpečení přenosu dat,... Výzkumná zpráva. 2018. CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004581 - MODULÁRNÍ SYSTÉM ENTER, UTB ve Zlíně pro COMINFO, a.s.

MARTÍNEK, T. Rešerše aktuálních řešení v oblasti vzdáleného monitoringu a správy zabraňovacích systémů. Výzkumná zpráva. 2019. CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004581 - MODULÁRNÍ SYSTÉM ENTER, UTB ve Zlíně pro COMINFO, a.s.

MARTÍNEK, T. Definice požadavků zákazníků v oblasti přístupových a návštěvnických systémů. Výzkumná zpráva. 2019. CZ.01.1.02/0.0/0.0/15_019/0004581 - MODULÁRNÍ SYSTÉM ENTER, UTB ve Zlíně pro COMINFO, a.s.

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA



OSOBNÍ ÚDAJE Tomáš Martínek

📍 Komárov 228, 78372 Velký Týnec (Česká republika)

☎ +420608722790

✉ tomas.martinek.88@email.cz

Datum narození 26/09/1988

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

01/2014–do současnosti **Projektový výzkum**
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, CEBIA-Tech, Zlín (Česká republika)

09/2017–do současnosti **Akademický pracovník - Asistent**
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Zlín (Česká republika)

VZDĚLÁNÍ, ODBORNÁ PŘÍPRAVA A KURZY

2013–do současnosti **Ph.D. Studium**
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Zlín (Česká republika)

2008–2013 **Titul Ing. - Inženýrská informatika (Bezpečnostní technologie, systémy a management)**
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Zlín (Česká republika)
Diplomová práce: Zobrazování struktur elektronických systémů pomocí skenovací mikrovlnné mikroskopie
Bakalářská práce: Skenovací impedanční mikroskopie

OSOBNÍ DOVEDNOSTI

Mateřský jazyk čeština

Další jazyky

	POROZUMĚNÍ		MLUVENÍ		PÍSEMNÝ PROJEV
	Poslech	Čtení	Ústní interakce	Samostatný ústní projev	
angličtina	C1	C1	C1	C1	C1
ruština	B1	B1	B1	B1	B1

Úroveň: A1 a A2: základní uživatel - B1 a B2: samostatný uživatel - C1 a C2: zkušený uživatel
Společný evropský referenční rámec pro jazyky

Ing. Tomáš Martínek, Ph.D.

**Diagnostické metody pro určení prahu perkolace ultratenkých
vrstev wolframu**

Diagnostic Methods for Percolation Threshold Determination of Ultra-Thin
Tungsten Layers

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Tomáš Martínek, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2019

ISBN 978-80-7454-864-2

