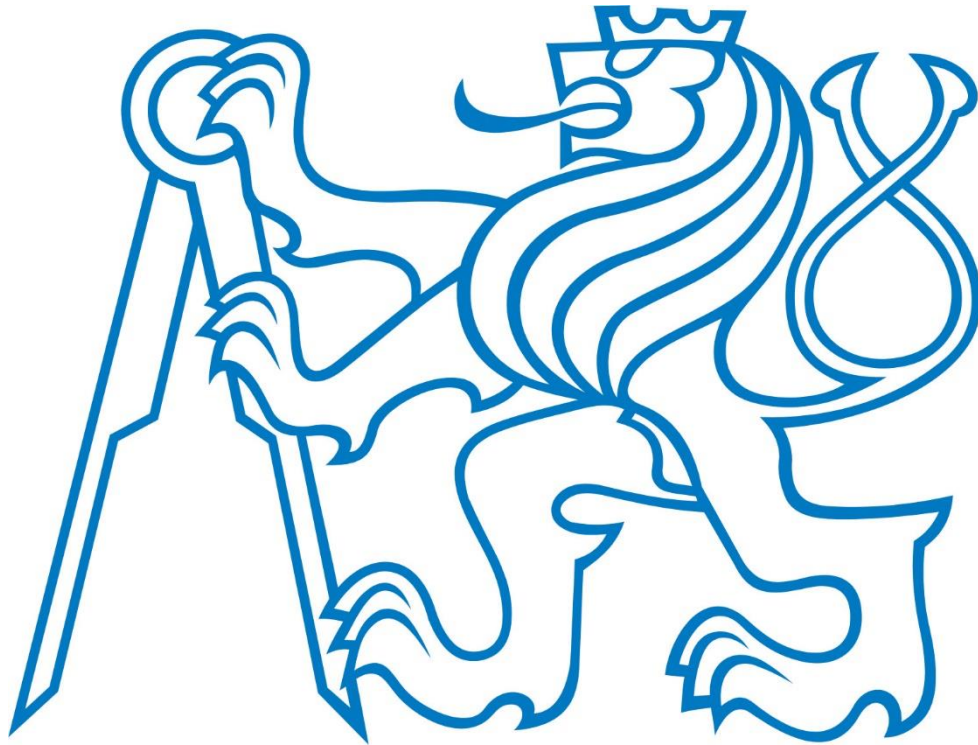


České vysoké učení technické
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie
Obor: Aplikovaná elektrotechnika



Využití tenkých vrstev ve výrobě hybridních integrovaných
obvodů

Thin Film Layers in Fabrication of Hybrid Integrated Circuits

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracovala: Eva Horynová
Vedoucí práce: Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, PhD.
Rok: 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Eva Horynová**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Využití tenkých vrstev ve výrobě hybridních integrovaných obvodů**

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte rozbor technologií používaných ve výrobě hybridních integrovaných obvodů
2. Zaměřte se podrobněji na tenkovrstvé technologie.
3. Připravte vzorky tenkých vrstev metodou napařování nebo naprašování a vzorky analyzujte.

Seznam odborné literatury:

- [1] Eckertová, L.: Fyzika tenkých vrstev, SNTL Praha 1973
- [2] Seshan, K.: Handbook of thin-film deposition processes and techniques : principles, methods, equipment and applications, Norwich 2002

Vedoucí: Ivana Pelikánová Beshajová Ing., Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....
Eva Horynová

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovala.

Název práce:

Využití tenkých vrstev ve výrobě hybridních integrovaných obvodů

Autor: Eva Horynová

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Ivana Beshajová Pelikánová PhD.
Katedra elektrotechnologie, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze

Abstrakt: Práce pojednává o využití tenkých vrstev ve výrobě hybridních integrovaných obvodů. Nejdříve se zabývá postupem při jejich výrobě a popisuje souhrn technologií, které se zde používají a poté se blíže zaměřuje na vlastnosti tenkých vrstev, hlavně z fyzikálního hlediska, a jejich využití v různých technických odvětvích s důrazem na elektrotechniku. V další části jsou shrnuty výsledky měření důležitých parametrů tenkých vrstev na vyrobených vzorcích a je zde porovnána výroba napařováním a napařováním, použití různých substrátů a vliv dalších podmínek, které mohou ovlivňovat kvalitu výsledné vrstvy a jakým způsobem ji ovlivňují.

Klíčová slova: tenké vrstvy, napařování, napařování, hybridní integrované obvody

Title:

Thin Film Layers in Fabrication of Hybrid Integrated Circuits

Author: Eva Horynová

Abstract: The thesis topic is the use of thin film layers in fabrication of hybrid integrated circuits. In the first part, fabrication process of these circuits and used technologies are described. In the second part the focus is on characteristics of thin film layers, especially its physical properties, and their use in many technical fields with emphasis on electrotechnology. Next part summarize the results of measurements of important parameters that can be observed in thin film layers technology. For this purpose, samples were created using different depositing technologies (vacuum evaporation and sputtering), substrate materials, and varying several other parameters. This allows comparison of different ways of thin film layer deposition and effect of conditions on resulting quality of hybrid integrated circuit made of thin film layers.

Key words: thin film layers, hybrid integrated circuits, vacuum evaporation, sputtering

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Obecně o integrovaných obvodech.....	10
2.1	Základní rozdělení IO	10
2.2	Vrstvové obvody	10
2.3	Monolitické obvody	11
2.4	Hybridní integrované obvody	11
3	Technologie používané ve výrobě hybridních integrovaných obvodů.....	11
3.1	Podložky.....	12
3.1.1	Monokrystalické materiály	13
3.1.2	Sklo	13
3.1.3	Keramické materiály	13
3.1.4	Organické materiály.....	14
3.2	Vrstvové technologie	14
3.2.1	Tlusté vrstvy	15
3.2.2	Porovnání tenkých a tlustých vrstev	17
4	Tenké vrstvy	17
4.1	Vakuová technologie.....	18
4.1.1	Vytváření vakua.....	19
4.2	Způsoby nanášení.....	21
4.2.1	CVD.....	21
4.2.2	PVD	22
4.3	Vlastnosti tenkých vrstev a jejich měření	24
4.3.1	Tloušťka.....	25
4.3.2	Adheze	27
4.3.3	Homogenita.....	28
4.3.4	Vodivost.....	28
4.4	Využití tenkých vrstev	28
4.4.1	Mimo elektrotechniku.....	29
4.4.2	Elektrotechnika	29
5	Výroba vzorků a jejich proměřování	29
5.1	Použité přístroje	29
5.1.1	Naprašovačka.....	29
5.1.2	Napařovačka	30
5.1.3	Talysurf.....	32

5.2	Vyrobené vzorky	35
5.2.1	Naprášené / sklo / 50 W / 15 minut	35
5.2.2	Naprášené / korund / 50 W / 15 minut.....	38
5.2.3	Naprášené / sklo / 80 W / 15 minut	39
5.2.4	Napařené / délka 50 mm	41
5.2.5	Napařené / délka 40 mm	44
6	Závěr	44
7	Bibliografie	46

GRAF 1 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY NA VZORKU 1	36
GRAF 2 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY NA VZORKU 3	37
GRAF 3 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY NA VZORKU 4	38
GRAF 4 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 7	39
GRAF 5 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 8	40
GRAF 6 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 10	41
GRAF 7 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 5	42
GRAF 8 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 6	43
GRAF 9 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 9	44
OBR. 1 ROZDĚLENÍ INTEGROVANÝCH OBVODŮ (RACHŮNEK, 2011)	10
OBR. 2 PROFILY POVRCHŮ PODLOŽEK (ECKERTOVÁ, 1973)	12
OBR. 3 NANÁŠENÍ PASTY SÍTOTISKEM (SZENDIUCH, 2012-2013)	16
OBR. 4 ZDROJE, MĚŘENÍ A VYUŽITÍ VAKUA (ERBEN, 2008)	19
OBR. 5 SCHÉMATICKÝ ŘEZ OLEJOVOU ROTAČNÍ VÝVĚVOU (ŠAVEL, 2003)	20
OBR. 6 NAPŘOVNÁNÍ (ADÁMEK)	22
OBR. 7 KATODOVÉ NAPRAŠOVÁNÍ (ADÁMEK)	23
OBR. 8 HODNOCENÍ PORUŠENÍ OKOLÍ VTISKU VYTVOŘENÉHO ROCKWELLOVÝM INDENTOREM PŘI 1500N (ATEAM, 2005)	27
OBR. 9 POUŽITÁ NAPRAŠOVAČKA (KOBÍŽEK)	30
OBR. 10 POUŽITÁ NAPAŘOVAČKA (KOBÍŽEK)	31
OBR. 11 FOTO PRACOVIŠTĚ A POPIS TALYSTEPU	32
OBR. 12 SEJMUTÝ PROFIL PO OTEVŘENÍ V PROGRAMU TALY PROFILE GOLD	32
OBR. 13 VYROVNANÝ PROFIL POMOCÍ FUNKCE LEVELING	33
OBR. 14 VYROVNANÝ A OŘÍZNUTÝ PROFIL	33
OBR. 15 VYFILTROVANÝ PRŮBĚH PROFILU	33
OBR. 16 PROMĚŘENÁ TLOUŠŤKA VRSTVY	34
OBR. 17 SEJMUTÝ PROFIL PRO MĚŘENÍ DRSNOSTI	34
OBR. 18 VYHODNOCOVACÍ TABULKA DRSNOSTI	34
OBR. 19 FOTO VZORKU 1	35
OBR. 20 FOTO VZORKU 3	36
OBR. 21 FOTO VZORKU 4	37
OBR. 22 FOTO VZORKU 2	38
OBR. 23 FOTO VZORKU 7	39
OBR. 24 FOTO VZORKU 8	40
OBR. 25 FOTO VZORKU 10	41
OBR. 26 FOTO VZORKU 5	42
OBR. 27 FOTO VZORKU 6	43
OBR. 28 FOTO VZORKU 9	44
TAB. 1 VLASTNOSTI KERAMICKÝCH MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PRO VÝROBU SUBSTRÁTŮ (SZENDIUCH, 2012-2013)	14
TAB. 2 VLASTNOSTI ORGANICKÝCH MATERIÁLŮ (SZENDIUCH)	14
TAB. 3 SROVNÁNÍ PARAMETRŮ TENKÝCH A TLUSTÝCH VRSTEV (SZENDIUCH, 2006)	17
TAB. 4 SROVNÁNÍ PVD A CVD METOD	21
TAB. 5 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 1	35
TAB. 6 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY NA VZORKU 3	36
TAB. 7 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY NA VZORKU 4	37
TAB. 8 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 7	39
TAB. 9 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 8	40
TAB. 10 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 10	41
TAB. 11 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 5	42
TAB. 12 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 6	43
TAB. 13 ROZLOŽENÍ TLOUŠŤKY VRSTVY NA VZORKU 9	44
TAB. 14 SROVNÁNÍ VÝPOČTENÝCH A NAMĚŘENÝCH ODPORŮ	45

1 Úvod

Tato práce se zabývá využitím tenkých vrstev ve výrobě hybridních integrovaných obvodů. Nejdříve se věnuje obecně integrovaným obvodům, jejich druhům a způsobu výroby.

Třetí kapitola je zaměřená na přiblížení všech postupů používaných při výrobě hybridních integrovaných obvodů a je rozdělená na čtyři části. V první části jsou probírány vlastnosti podložek integrovaných obvodů a porovnání různých materiálů, ze kterých mohou být podložky vyrobeny. Druhá část se zabývá nanášením vrstev na podložky. Zde je popsán jen postup při výrobě tlustých vrstev, protože tenkými vrstvami se tato práce zabývá podrobněji dále. Poté jsou zde také porovnány vlastnosti tenkých a tlustých vrstev.

Ve čtvrté kapitole je pozornost věnována tenkým vrstvám. Nejdříve je zde uvedeno, že ve většině případů se vyrábí vakuovými metodami a proto je zde popsáno jaké jsou možnosti, jak dosáhnout vakua. Dále jsou zmíněny různé způsoby nanášení tenkých vrstev jak PVD tak CVD. Poté jsou uvedeny některé důležité vlastnosti tenkých vrstev, jejich vliv na konečný výsledek a také způsoby zjišťování. Nakonec je stručně uvedeno, kde se tenké vrstvy používají a to, jak v elektrotechnice, tak i v jiných odvětvích.

Poslední, pátá, kapitola je věnována praktické části. Nejdříve je uvedeno, jaké způsoby výroby tenkých vrstev byly použity a jak byli měřeny. Jsou zde popsány přístroje a jak se v jednotlivých částech postupovalo. Poté se práce zaměřuje na jednotlivé vzorky. Jsou tu uvedené jejich fotky, naměřené hodnoty a vytvořené grafy rozložená tloušťky vrstvy na vzorku.

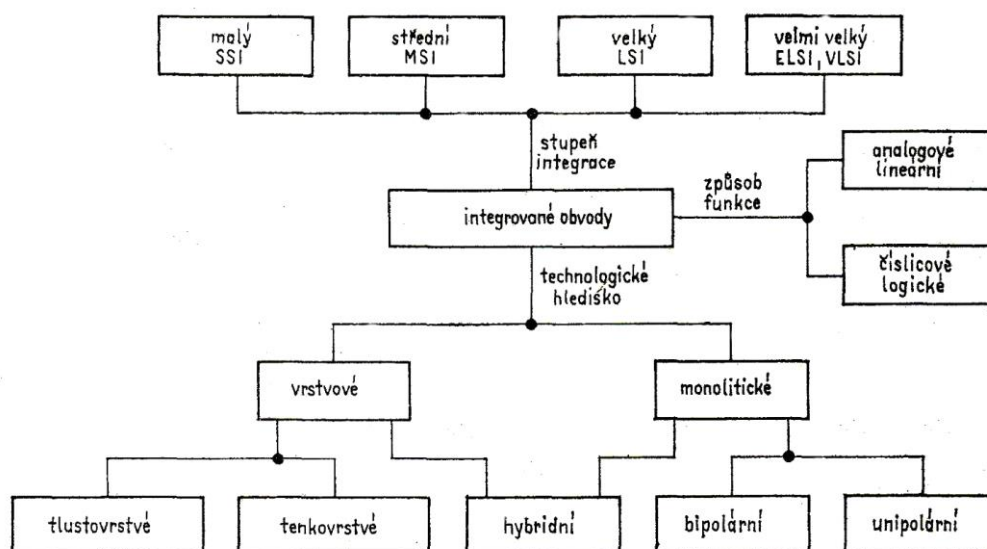
V závěru jsou jednotlivé výsledky zhodnoceny a je uzavřeno, k čemu se v průběhu práce došlo a jak bylo vyrábění a měření vzorků úspěšné.

2 Obecně o integrovaných obvodech

Slovo integrovaný znamená (dle slovníku cizích slov) spojený, sjednocený, propojený atp. Tato práce se věnuje součástkám, které se nazývají právě integrované obvody. Jsou to elektronické součástky, skládající se ze spousty jednoduchých elektrických prvků dohromady tvořících elektrický obvod, který je schopen vykonávat složitější funkci. Elektrické prvky použité při jejich výrobě je možné rozdělit na aktivní (např. tranzistor) a pasivní (diody, rezistory, kondenzátory apod.). Tyto prvky jsou uloženy na jedné nosné, nejčastěji křemíkové, destičce.

V dnešní době mají integrované obvody velice široké využití. V podstatě je možné je najít v každém elektronickém zařízení, denního použití, jakým je například mobilní telefon, počítač, kalkulačka, MP3 přehrávač, televize atd. Široké využití ale mají například i v dopravě, lékařství nebo průmyslu.

2.1 Základní rozdělení IO



Obr. 1 Rozdělení integrovaných obvodů (Rachůnek, 2011)

Jak je vidět na obrázku výše, z technologického hlediska, které nás nejvíce zajímá, lze integrované obvody rozdělit na tři hlavní skupiny: vrstvé, monolitické a jejich kombinaci – hybridní. Hybridním obvodům se věnuje většina této práce, a proto budou probrány v nadcházejících kapitolách podrobněji. O prvních dvou skupinách zde budou uvedeny jen některé základní informace.

2.2 Vrstvé obvody

Vrstvé obvody jsou charakterizovány svojí tloušťkou, která má zásadní význam pro konečné vlastnosti celého obvodu. Podle ní se rozlišují na tlustovrstvé obvody (desítky μm) a tenkovrstvé obvody (desítky nm až jednotky μm). Nicméně pomocí vrstevných technologií nelze vytvořit aktivní součástky a proto se vrstvé

obvody již nevyrobějí a vrstevné technologie jsou v elektrotechnice používané při výrobě hybridních integrovaných obvodů.

2.3 Monolitické obvody

Monolitické obvody jsou dnes nejrozšířenějším druhem integrovaných obvodů, protože jsou nejvhodnější pro hromadnou sériovou výrobu. Celý obvod je tvořen pouze z jedné, nejčastěji křemíkové, polovodičové destičky, na které jsou různými metodami vytvořeny součástky. Křemík pro výrobu integrovaných obvodů musí být monokrystalický, velice čistý, bez poruch v krystalické mřížce. Při výrobě se monokrystal křemíku se nařeže na plátky velice malé tloušťky, tzv. wafery. Poté, co je wafer připraven na další použití, je třeba na něm vytvořit vrstvu SiO_2 . Toho lze dosáhnout například oxidací ve vodních parách. Vrstva je vytvořena na celé ploše waferu, ale ne všude je žádoucí, a proto je třeba ji na určených místech odstranit. To je obvykle prováděno pomocí fotolitografie. Poté je třeba v odleptaných místech polovodič nadotovat na požadovaný typ. To lze provádět hlavně dvěma způsoby. Jeden z nich je, že destičku je vložena do plynu s příměsí některého z prvků, který je schopný vytvořit dotovaný polovodič typu P nebo N, a zahřáta na teplotu blízkou tavnému bodu křemíku. Tento způsob je rychlejší ale méně rozměrově přesný. Další možnost je iontová implementace, to znamená, že destička je v místech odleptání „bombardována“ iontovými svazky. Tento způsob je složitější, pomalejší ale je možné s ním dosáhnout velké rozměrové přesnosti. Těmito způsoby jsou vytvářeny hlavně tranzistory. Poté, co jsou na destičce vytvořeny požadované součástky (to může znamenat opakování litografie mnohokrát za sebou) je třeba destičku opatřit ochrannou vrstvou SiO_2 a tu vyleptat na místech kde budou vyvedeny kontakty. Tyto plošky jsou následně pokoveny naprašování, nebo napařením, o kterých bude více napsáno později. Poté je obvod zapouzdřen.

2.4 Hybridní integrované obvody

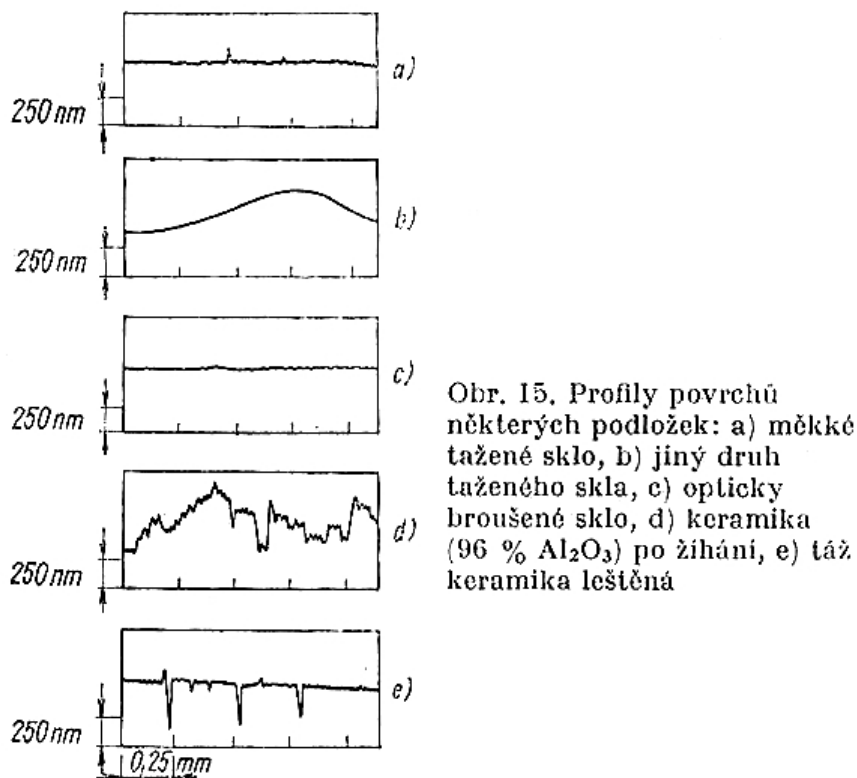
V hybridních obvodech jsou využívány výhody vrstevných obvodů a poté jsou osazovány součástkami, které není možné vrstevnými technologiemi vytvořit. Díky propojení dvou technologií lze vytvořit obvody, které mají příznivé vlastnosti jako vysoká elektrická pevnost a mechanická odolnost a proto se hodí pro náročnější aplikace, kde jsou na tyto aspekty kladeny vysoké nároky. Bohužel výroba hybridních integrovaných obvodů je značně složitější než výroba monolitických obvodů a tudíž i dražší a právě proto se používají jen v náročnějších aplikacích, kde by ostatní typy obvodů neobstály.

3 Technologie používané ve výrobě hybridních integrovaných obvodů

Postup výroby hybridních integrovaných obvodů je možné rozdělit na čtyři nejdůležitější části. Těmi jsou: výroba substrátu neboli podložky, nanesení pasivní součástek (pomocí vrstevných technologií), osazení aktivními součástkami a pouzdrění. Následující podkapitoly se budou věnovat jen prvním dvěma částem, protože na ty je zaměřena i praktická část této práce.

3.1 Podložky

Při výrobě obvodů se nanáší různé druhy vrstev (vodivé, odporové a dielektrické) na povrch izolačního materiálu neboli substrátu. Tato podložka musí splňovat několik nejdůležitějších funkcí. První z nich je to, že „nese“ celý obvod. Je tedy nutné, aby podložka byla dostatečně mechanicky pevná. Co se týče mechanický vlastností tak stejně důležitá je hladkost povrchu vrstvy. Na ní totiž záleží jak dobře nanášený materiál k substrátu přilne a proto i úspěch celé výroby. Na následujícím obrázku je vidět povrch různých materiálu, které se pro podložky používají.



Obr. 2 Profily povrchů podložek (Eckertová, 1973)

Další důležitý aspekt je chemické složení substrátu. Je třeba dosáhnout toho, aby substrát nereagoval s nanášeným materiálem a netvořil nežádoucí sloučeniny (v některých případech je tato vlastnost ale naopak žádoucí a je snaha mezi vrstvou a substrátem vytvořit sloučeninu, která zajistí lepší přilnavost) a také toho, aby nereagoval s okolním prostředím (nekorodoval apod.).

Jelikož se jedná o součástky používané v elektrotechnice, jsou důležité elektrické vlastnosti. Nejdůležitější je elektrická vodivost, kdy je snaha dosáhnout toho, aby jednotlivé prvky obvody od sebe byli izolovány. S tím souvisí i elektrická pevnost, tj. velikost intenzity elektrického pole, při které vznikne průraz a izolant začne vést proud. U tenkovrstvých obvodů je ale tato vlastnost nedůležitá, protože se používají pro nízké úrovně napětí.

Další důležitou elektrickou vlastností je permitivita, která udává měřítko polarizace, tj. toho kolik náboje je na sebe izolant schopný navázat. Třetí důležitou

elektrickou vlastností je ztrátový činitel, který udává procentuální množství energie přeměněné na teplo. Z toho vyplývá, že žádoucí je co nejmenší ztrátový činitel.

Posledními, ale neméně důležitými vlastnostmi, jsou vlastnosti tepelné. Je třeba, aby materiál byl dostatečně tepelně vodivý, protože velká část tepla se odvádí právě přes podložku a je také třeba, aby byl materiál dostatečně tepelně stabilní, tj. aby se při různých teplotách neměnily jeho ostatní důležité vlastnosti. O výhodách a nevýhodách vybraných materiálů pojednávají další podkapitoly.

3.1.1 Monokrystalické materiály

V případě monokrystalických materiálů je možné dosáhnout v podstatě dokonalé hladkosti a to díky tomu, že jednotlivé podložky jsou vyrobeny štěpením. Nicméně tyto materiály se pro výrobu hybridních integrovaných obvodů nevyužívají, jejich hlavní využití je ve výrobě monolitických integrovaných obvodů. Nejdůležitějšími materiály jsou křemík Si, galiumarsenid GaAs a germanium Ge.

3.1.2 Sklo

Anorganický materiál skládající se z SiO_2 neboli oxidu křemičitého s případným přidáním sloučenin, jehož hlavní výhodou je jeho hladký povrch (jak je vidět na obrázku Obr. 2). Ten vzniká už při výrobě skla a je možné ještě zvýšit jeho hladkost například leštěním či broušením. Sklo je také dostatečně mechanicky pevné (řádově jednotky MPa - zvyšuje se s obsahem SiO_2 ve sloučenině), disponuje dostatečnou tepelnou vodivostí (okolo 1 W/m.K při pokojové teplotě) a jeho výroba není náročná ani drahá a proto je používán pro méně náročné aplikace.

3.1.3 Keramické materiály

Keramické materiály se vyznačují výbornými vlastnostmi, jak je vidět v následující tabulce. Mají stejně jako sklo velkou pevnost ale i křehkost. Jejich výroba je ale náročnější a tudíž dražší než výroba skla. Nicméně skoro všechny parametry mají mnohonásobně lepší než skleněné substráty a to je předurčuje pro širší využití. Jejich hlavní nevýhodou je vysoká drsnost povrchu, která je daná tím, že keramika se skládá ze spěkaných zrn. I zde je ale možné dosáhnout určitého zlepšení broušením či leštěním nebo glazováním (nanesení tenké vrstvy křemičité skloviny na povrch). V následující tabulce je vidět porovnání důležitých vlastností některých keramických materiálů, mezi které patří korund Al_2O_3 , oxid berylnatý BeO a nitrid hlinitý AlN. Jak lze vidět, nejlepší vlastnosti má oxid berylnatý, jehož výroba je ale toxická, tudíž se používá jen ve speciálních případech například ve výkonové elektronice. Nejpožívanějším keramickým materiálem je právě korund.

Tab. 1 Vlastnosti keramických materiálů používaných pro výrobu substrátů (Szendiuch, 2012-2013)

Parametr / Materiál	96 % Al ₂ O ₃	99,5 % Al ₂ O ₃ *)	99 % BeO,)	AlN
Tepelná vodivost (J.s-1.m-1.K-1)	35	37	250	170
Součinitel teplotní roztažnosti (ppm . K-1)	6,4	6,6	5	4,5
Elektrická pevnost (kV. mm-1)	8	9	14	12
Měrný odpor (Ω. mm)	7. 10 ¹³	7. 10 ¹³	10 ¹⁴	> 10 ¹³
Tangenta ztrátového činitele (%) 100 MHz	0,55	0,08	0,04	7 - 20
Relativní permitivita ε _r	9	10	6,6	9 - 10

*) používá se pro tenkovrstvé obvody

) toxický keramický materiál používaný v omezené míře pro výkonové aplikace

3.1.4 Organické materiály

Jedná se o široce používané materiály a to hlavně pro jejich nízkou cenu. Jsou vhodné jen pro velice nenáročné aplikace, protože nemají dobře požadované vlastnosti. Mezi tři základní materiály se řadí: FR-2 neboli fenolformaldehydová pryskyřice, FR-3, což je kombinace tvrzeného papíru a epoxidové pryskyřice a FR-4 neboli skloepoxidový laminát.

Tab. 2 Vlastnosti organických materiálů (Szendiuch)

Parametr / Materiál	FR-2	FR-3	FR-4
• Permittivita (1 MHz)	4,5	4,6	4,9
• Elektrická pevnost (kV. mm-1)	60 - 70	60 - 65	35 - 65
• Tepelná vodivost (J.s-1.m-1.K-1)	0,24	0,23	0,25
• Součinitel teplotní roztažnosti (ppm . K-1)	11	13	11
• Adsorpce vlhkosti (%)	0,8	0,75	0,35
• Pevnost v tahu (Mpa . mm2)	88	83	280

3.2 Vrstvové technologie

Vrstvové technologie jsou charakterizovny svojí tloušťkou, která má zásadní význam pro konečné vlastnosti celého obvodu. Rozlišují se tlusté vrstvy (desítky μm) a tenké vrstvy (desítky nm až jednotky μm). Tyto vrstvy mohou být buď vodivé, odporové nebo dielektrické a zaměřuje se u nich na dva nejdůležitější parametry. U vodivých a odporových vrstev na vrstvomý odpor neboli „odpor na čtverec“ a u dielektrických vrstev na vrstvomou kapacitu.

Odpor na čtverec lze vypočítat ze vzorce:

$$R = \frac{\rho}{h} \times \frac{l}{w} = R_{\square} \times \frac{l}{w} \Rightarrow R_{\square} = \frac{\rho}{h} \Rightarrow R_{\square} = R \times \frac{w}{l} \quad (1)$$

kde	R	celkový odpor vrstvy [Ω],
	ρ	měrný odpor [$\Omega \times m$]
	h	tloušťka odporové vrstvy [m]
	l	délka odporové vrstvy [m]
	w	šířka odporové vrstvy [m]
	R_{\square}	vrstvový odpor [Ω/\square]

A vrstvou kapacitu lze vypočítat ze vzorce:

$$C = 0,0885 \times \varepsilon_r \times \frac{a \times b}{t_d} = C_o \times a \times b = C_o \times S_c \quad (2)$$

kde	C	celková kapacita vrstvy [F]
	t_d	tloušťka dielektrické vrstvy [m]
	a, b	rozměry kondenzátoru [m]
	C_o	vrstvová kapacita [$F \times m^{-2}$]
	S_c	plocha kondenzátoru [m^2]
	ε_r	relativní permitivita [$F \times m^{-1}$]

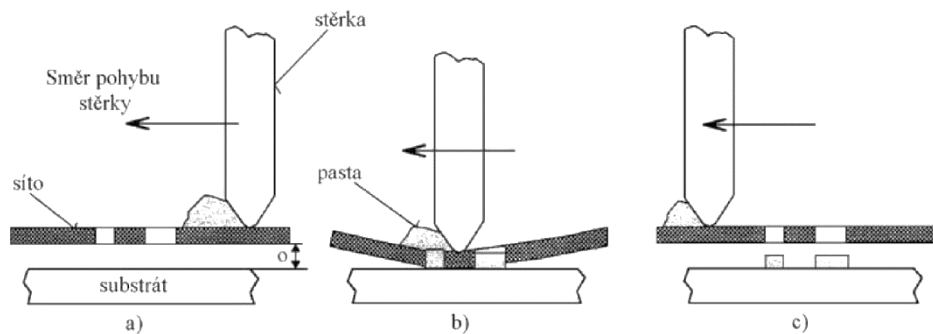
3.2.1 Tlusté vrstvy

O tlusté vrstvě se jedná, pokud je vrstva výrazně tlustší, než je délka střední volné dráhy elektronu, tj. dráhy, kterou urazí částice mezi dvěma srážkami. Typická tloušťka tlusté vrstvy se pohybuje v desítkách μm , pokud je vrstva slabší, získává jiné fyzikální vlastnosti a nazývá se tenkou vrstvou. Jejich vlastnosti ovlivňuje hlavně chemické složení vrstvy, na rozdíl od tenkých vrstev, kde vlastnosti ovlivňuje hlavně tloušťka výsledné vrstvy. Výroba tlustých vrstev je také časově méně náročná a levnější a to hlavně z toho důvodu, že není nutné je vytvářet ve vakuu.

3.2.1.1 Postup při výrobě tlustých vrstev

Tlusté vrstvy se vytvářejí nevakuovými depozičními metodami¹: sítotiskem, šablonovým tiskem nebo popisem. Nejpoužívanější z nich je sítotisk, a proto je zde věnována největší pozornost hlavně tomuto způsobu výroby tlusté vrstvy. O dalších bude jen zmínka, popřípadě porovnání daného způsobu a sítotisku.

¹ materiál je na substrát přidáván a děje se tak při tlaku vyšším než v případě vakuových metod



Obr. 3 Nanášení pasty sítotiskem (Szendiuch, 2012-2013)

Jak již bylo řečeno, sítotisk je nevakuová depoziční metoda, což znamená, že materiál je na substrát přidáván a že se tak děje při tlaku vyšším než v případě vakuových metod. V tomto případě je materiálem nehomogenní pasta skládající se ze tří složek:

- složka funkční – rozhoduje o elektrickém charakteru pasty
- složka tavivová – zajišťuje viskozitu, při tepelné zpracování se odpaří
- složka pojivová – zajišťuje vazbu mezi funkční složkou a substrátem

Pasty je možné rozdělit podle jejich funkce do 5 kategorií:

- vodivé – jejich funkční složkou jsou vzácné kovy jako např. Au, Ag, Pt, Pd a jejich kombinace, vodivými se stávají až po přetavení
- odporové – jejich funkční složkou jsou nejčastěji oxidy vzácných kovů, možno vyrobit ve velkém rozsahu hodnot odporu na čtverec
- dielektrické a izolační – jejich funkční složkou jsou dielektrické nebo feroelektrické oxidy, použití: ochranná vrstva (velký R_{\square} , malá ϵ , malý $\text{tg } \delta$), izolace (velký R , minimální ϵ , velká E_p), kondenzátory
- speciální – např. termistorové, pro topná tělesa, pro zobrazovací prvky, feromagnetické, piezoelektrické

Jak lze vidět na Obr. 3, pasta je nanášena na síto a pomocí stěrky je přenášena na substrát. V tomto případě stěrka roztírá pastu a zároveň přitlačuje síto k substrátu. Ale pro aplikace, kde je třeba dbát na přesnější tvar, je postup takový, že stěrka přejede přes síto dvakrát, nejprve vtlačí pastu do otvorů v sítu a až při druhém pohybu přitiskne síto k substrátu a pasta se na něj přenesou. Poté se síto uvolní a na substrátu zůstane jen požadovaný motiv. Nejčastěji používaná síta jsou ze syntetických materiálů, v náročnějších případech z nerezové oceli.

Dalším způsobem nanášení tlustých vrstev je šablonový tisk. Tato metoda je velice podobná sítotisku, jediný rozdíl je, že pasta je nanášena přes šablonu pevného materiálu, která je po celou dobu procesu připevněná přímo na povrch substrátu.

Postup dosahující nejvyšší rozměrové přesnosti je vytváření tlustých vrstev popisem, při kterém je pasta nanášena na podložku pomocí hrotu či dávkovače. Tento způsob je ovšem velice časově i finančně náročný a proto se používá jen ve výjimečných případech, kdy je třeba větší přesnost.

Všechny výše zmíněné způsoby potřebují po nanesení tuto pastu ještě přetavit (pojivová složka změkne, tavivová složka se odpaří, funkční složka se usadí v pojivové). Teplota vypalování závisí na materiálu, ze kterého je daná tlustá vrstva tvořena. Typická teplota se pohybuje okolo 800°C a je nutné dodržet teplotní profil výpalu. Pro speciální pasty, například polymerní, je dostačující teplota okolo 200°C a celkově je proces méně náročný.

3.2.2 Porovnání tenkých a tlustých vrstev

Jak bylo již zmíněno dříve, kromě tlustých vrstev existují ještě vrstvy tenké, vyznačující se odlišnými vlastnostmi a o nich je kapitola 4. Je vhodné ale porovnat vlastnosti těchto vrstev. Každá z těchto technologií má své výhody, které je předurčují pro jejich použití. V následující tabulce vidíme srovnání některých jejich parametrů. Můžeme zde sledovat to, že tenké vrstvy jsou rozměrově přesnější a mají menší ztrátový výkon, ale tlusté vrstvy jsou mnohonásobně stabilnější a je možné pomocí nich vyrábět rezistory v mnohem větším rozsahu.

Parametr	Tenké vrstvy	Tlusté vrstvy
Rozlišení čára/mezera [μm]	10 (5)	100 (50)
Vrstvový odpor vodičů [$\text{m}\Omega$]	< 1	< 30, (5)
Předhodnota pro rezistory [Ω]	100 – 500	10, 100, 1000, 10^4 , 10^5 , 10^6
TCR [$\text{ppm} \cdot \text{K}^{-1}$]	< 100 (30)	100 – 400
Stabilita, 70°C, 1000 h [%]	0,1	0,5
$P_{\text{ztrátový}}$ [$\text{W} \cdot \text{cm}^2$]	0,2	1,5
Proudový šum [$\mu\text{V}/\text{V}$]	0,05	0,3 (100 Ω) – 3 (100 k Ω)

Tab. 3 Srovnání parametrů tenkých a tlustých vrstev (Szendiuch, 2006)

4 Tenké vrstvy

O tenkých vrstvách se jedná v případě, kdy se tloušťka dané vrstvy pohybuje od desítek nm do jednotek μm . Kvůli této tloušťce mají vrstvy velice malý objem, díky kterému získávají odlišné fyzikální vlastnosti, než mají tělesa s větším objemem. Tyto vlastnosti zajišťují čím dál větší využití tenkých vrstev, např. vrstvy na řezných a vrtacích nástrojích pro větší tvrdost povrchu nebo ošetřování skel brýlí antireflexní vrstvou. My se zde ale budeme zabývat využitím tenkých vrstev v elektrotechnologii,

konkrétně při výrobě hybridních integrovaných obvodů, kde má tato technologie velmi široké spektrum použití.

Při výrobě tenkých vrstev je třeba jako první připravit povrch, aby byl dostatečně hladký. Toho lze dosáhnout glazováním povrchu roztavenou skleněnou fritou nebo broušením povrchu. Tyto způsoby zajistí, že povrchu bude mít velice malou drsnost. Více o hladkosti povrchu je v kapitole 3.1. Poté na již upravený povrch jsou nanášeny vrstvy. V podstatě jsou dvě možnosti, buď vrstvu nanést přes masku a získat rovnou požadovaný motiv nebo postupně nanést jednotlivé vrstvy (odporové, vodivé atd.) a poté je dle požadavků odleptat. Samotné nanášení se realizuje různými metodami a nejpoužívanější z nich jsou prováděny ve vakuu. Po nanesení materiálu se vrstvy ještě vytvrzují tzv. stabilizačním žíháním při teplotách cca. 100-300 °C podle materiálu.

4.1 Vakuová technologie

Vakuum je při výrobě tenkých vrstev důležité proto, že kdyby se napařování a naprašování provádělo při normální atmosféře, střední volná dráha uvolněné částice² by byla velice krátká a částice by se po chvíli srazila s molekulou vzduchu a nedorazila by na místo, kde má být. Tím, že se částice pohybují ve vakuu, tak jim nic nebrání v pohybu a jejich střední volná dráha se prodlužuje. Střední volnou dráhu je možné zjistit ze vztahu:

$$\lambda = \frac{1}{\frac{N}{V} \times \pi \times d^2 \times \sqrt{2}} \quad (3)$$

kde	λ	střední volná dráha [m]
	N	počet částic [-]
	V	objem tělesa [m ³]
	d	průměr částice [m]

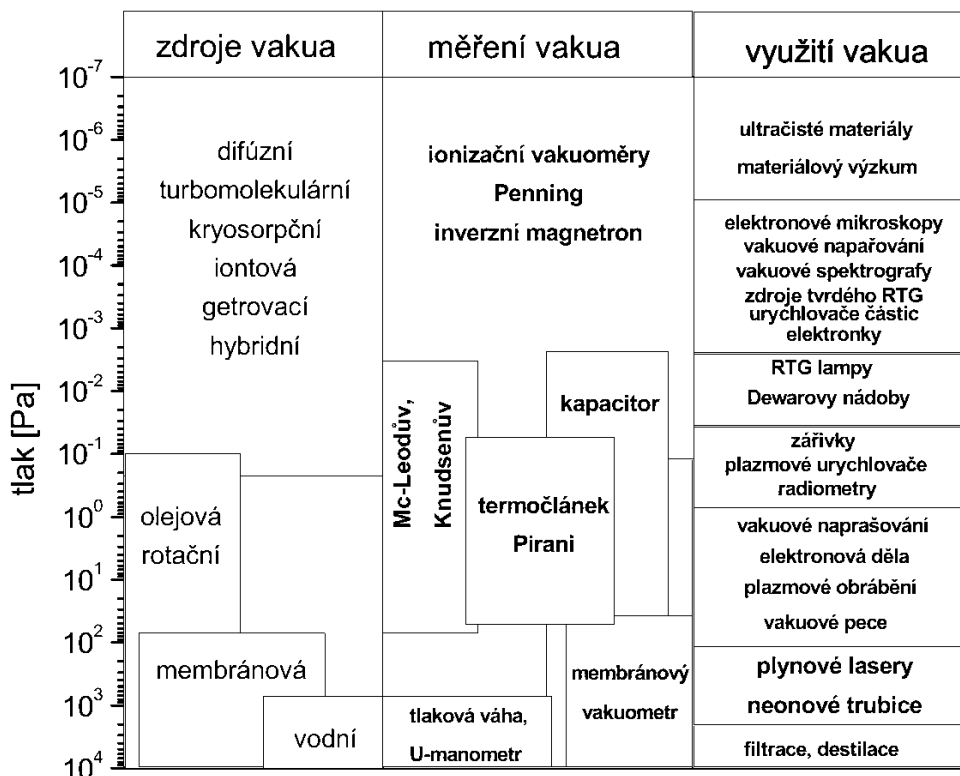
Vakuum lze rozdělit do několika tříd:

- dokonalé vakuum 0 Pa
- extrémně vysoké vakuum < 10⁻¹⁰ Pa
- ultravysoké vakuum 10⁻¹⁰ – 10⁻⁷ Pa
- vysoké vakuum 10⁻⁷ – 10⁻² Pa
- nízké vakuum 10⁻¹ – 10² Pa

² průměrná dráha, kterou částice urazí mezi dvěma srážkami s jinými částicemi; nepřímá úměrná na tlaku v plynu

- atmosférický tlak $101,25 \cdot 10^3$ Pa

V případě tenkých vrstev stačí přibližně nízké až vysoké vakua. Záleží na metodě vytváření vrstvy a ostatních podmínkách. Na Obr. 4 vidíme, pro co se jaké vakuum využívá, jak je možné ho dosáhnout a popřípadě jak ho změřit.



Obr. 4 Zdroje, měření a využití vakua (Erben, 2008)

4.1.1 Vytváření vakua

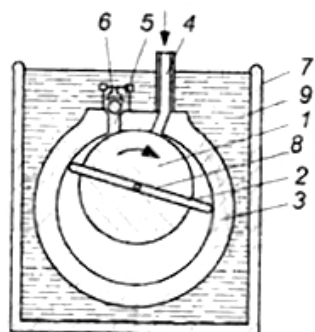
K dosažení vakua se používá zařízení zvané vývěva, což je čerpadlo odčerpávající plyn. Vývěvy je možné rozdělit podle toho, jakého vakua jsou schopné dosáhnout (viz výše) nebo podle konstrukce.

4.1.1.1 Transportní vývěvy

Fungují na principu, že molekuly transportují do jiného místa. Dále se dělí do dvou skupin dle způsobu transportu částic.

4.1.1.1.1 Mechanické

Mechanická vývěva funguje na principu změny objemu pracovní komory, čímž se mění tlak v komoře. Vývěvy mohou být pístové (dnes již používané velice zřídka) a rotační, tyto vývěvy jsou většinou olejové. Dosahují nízkého vakua a pro dosažení lepších výsledků je možné použít vývěvy dvoustupňové.



- 1 – válec excentricky uložený
- 2 – křídélka
- 3 – těleso vývěvy
- 4 – sací hrdlo
- 5 – výfukový otvor
- 6 – kuličkový ventil
- 7 – skříň
- 8 – pružina
- 9 – olejová náplň

Obr. 5 Schématický řez olejovou rotační vývěvou (Šavel, 2003)

Jak je vidět na Obr. 5 v tělese vývěvy je dutina a v ní je uložen válec. Otáčením válce vzniká v dutině podtlak a je sem nasáván vzduch z vyčerpávaného prostoru.

4.1.1.1.2 Hybnostní

V případě hybnostní vývěvy je molekulám předán impuls ve směru čerpání, tím ve vstupní otvoru klesá tlak a je možné vyčerpávat požadovaný prostor. Je možné pomocí nich vytvořit vyšší vakuum ale většina z nich vyžaduje předčerpání prostoru. Existuje několik různých druhů těchto vývěv:

- kapalinová – molekuly jsou strhávány proudem kapaliny, nejčastěji vody
- difúzní – molekuly jsou strhávány proudem páry; často olejové, musí být chlazené
- molekulární – konstrukce podobná rotační vývěvě; drahá; lze dosáhnout až extrémně vysokého vakua

Pro větší účinnost je možné zapojit tyto vývěvy do vícestupňového systému.

4.1.1.2 Adsorbční vývěvy

Od transportních vývěv se liší hlavně tím, že molekuly poté, co jsou odčerpány z požadovaného prostoru, zůstávají ve vývěvě. Je také možné pomocí nich dosahovat vyššího vakua než v případě transportních.

4.1.1.2.1 Kondenzační

Kondenzační vývěvy pracují tak, že stěny vývěvy jsou chlazeny na nízkou teplotu a proto na nich molekuly kondenzují a tvoří zkondenzovanou vrstvu. Nejčastěji jsou chlazeny kapalným dusíkem nebo heliem. Nicméně čím je zkondenzovaná vrstva silnější, tím klesá účinnost vývěvy. Možností jak dosáhnout lepšího výsledku je chladit materiál, který je schopný do svých póru absorbovat molekuly, takovým materiálem může být například zeolit nebo aktivní uhlí.

4.1.1.2.2 Sorpční

Princip sorpčních vývěv je založen na chemické reakci molekul plynu a látky, kterou jsou pokryty stěny vývěvy nebo těleso uvnitř vývěvy. Stěny se nejčastěji pokrývají titanem, který na sebe dobře váže molekuly vzduchu. Výhodou toho

způsobu je, že mizí potřeba drahých chladiv, ale nevýhodou je, že i zdroje titanu se musí po vyčerpání měnit.

4.1.1.2.3 Iontové

Iontové vývěvy spojují princip hybnostních a sorpčních vývěv – nejdřív je molekula plynu zionizována a to urychluje její dopad na stěnu systému, který funguje jako katoda, a poté je opět absorbována látkou, kterou je tato katoda pokryta. Samotných iontových vývěv, které by jen ionizovali molekuly a neabsorbovali, se v podstatě nevyužívá, ale využívá se právě jejich kombinace se sorpčními vývěvami.

4.2 Způsoby nanášení

Způsobů jak vytvořit tenkou vrstvu je několik a je možné je rozdělit do dvou hlavních kategorií. Těmi jsou fyzikální (PVD) a chemické (CVD) vakuové nanášení. Jejich hlavní výhody a nevýhody jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4 Srovnání PVD a CVD metod

Hledisko	PVD	CVD
Podmínky při výrobě	nižší teploty vyšší vakuum netoxické materiály	vyšší teploty časově náročné potřeba toxických materiálů
Vlastnosti	menší vnitřní pnutí horší adheze horší tepelná stabilita	větší odolnost a stabilita dobrá adheze
Materiály	v podstatě neomezené	jen materiály v plynném skupenství

4.2.1 CVD

Chemická depozice využívá chemických reakcí v plynném stavu materiálu. Jedná se chemicky reaktivní materiály, zahřáté na vysokou teplotu (800°C a více), které reagují s podložkou a tvoří na ní tenkou vrstvu. Tento prekurzor³ může být jeden nebo i více. Vedlejší produkty chemického procesu jsou odstraněny pomocí vakuovým vývěv, nebo odstraněny proudem plynu. Ze standardní CVD vycházejí další metody, pro specifické aplikace. Každá z nich má určité výhody a nevýhody a jsou prováděny s různými podmínkami. Z těchto metod je v současnosti velice používanou metodou PECVD.

4.2.1.1 PECVD

Jedná se chemickou depozici, při které jsou prekurzory zionizovány. Toho lze dosáhnout výbojem např. doutnavým nebo vysokofrekvenčním. Tím vznikne plazma, díky které je prekurzor více chemicky reaktivní a je možné depozici provádět za nižší

³ reaktivní látka, která se účastní chemické reakce, pomocí které vzniká jiná chemická sloučenina

teploty (stačí již 250°C). Nevýhodou této metody je, že výsledná vrstva není tak čistá jako v případě běžné chemické depozice.

4.2.2 PVD

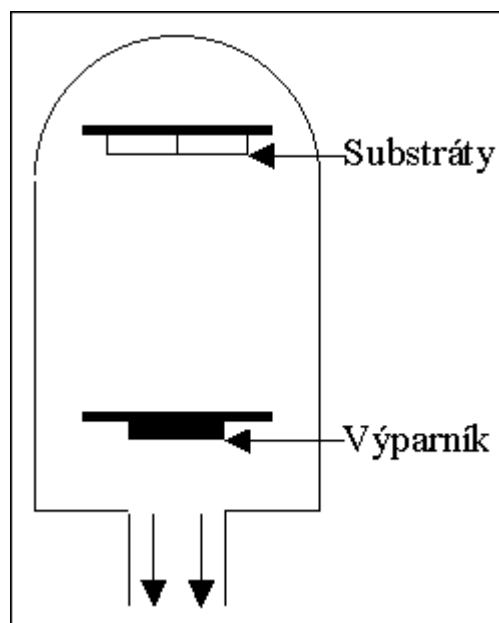
PVD neboli fyzikální vakuová depozice není na rozdíl od CVD založena na žádné chemické reakci. V podstatě tento postup lze rozdělit do 3 nejdůležitějších kroků, které při různých metodách probíhají různými způsoby.

1. výroba plynné fáze – pevný materiál je třeba přeměnit do plynné fáze
2. přenos molekul na substrát – vytvořený plyn je třeba přenést na určené místo
3. kondenzace materiálu – je třeba, aby se materiál uchytil na požadovaném místě

Dvě nejrozšířenější fyzikální metody jsou vakuové napařování a napařování a proto jim bude v této práci věnována největší pozornost.

4.2.2.1 Napařování

Díky zahřívání jsou částice nanášeného materiálu uvolňovány z materiálu. Tento děj se musí dít za rovnovážného tlaku, který se nesmí po dobu probíhajícího procesu měnit. Poté mohou uvolněné částice zkondenzovat tj. přejít z nejteplejšího místa, kterým je v našem případě nádoba na vypařování, na místo nejchladnější, kterým je v našem případě podložka. Ohřívání materiálu pro vypařování může být zajištěno odporovým ohřevem (nejčastější), laserovým svazkem, elektronovým svazkem, vysokofrekvenčním ohřevem atd. Celý proces napařování probíhá ve vakuu 10^{-4} - 10^{-6} Pa z důvodu zvětšení střední volné dráhy molekul nanášeného materiálu. Na následujícím obrázku vidíme náčrt zařízení, ve kterém napařování probíhá.



Obr. 6 Napařování (Adámek)

Proces musí probíhat v hlubokém vakuu (jednotky mPa) a to bývá zajištěno vývěvami, často je použita rotační vývěva a poté difúzní. Vakuum je nutné pro zajištění přímočarého pohybu molekul a jejich co nejdelší střední volné dráhy. Pravděpodobnost, že k odpaření dojde, je možné vyjádřit vztahem:

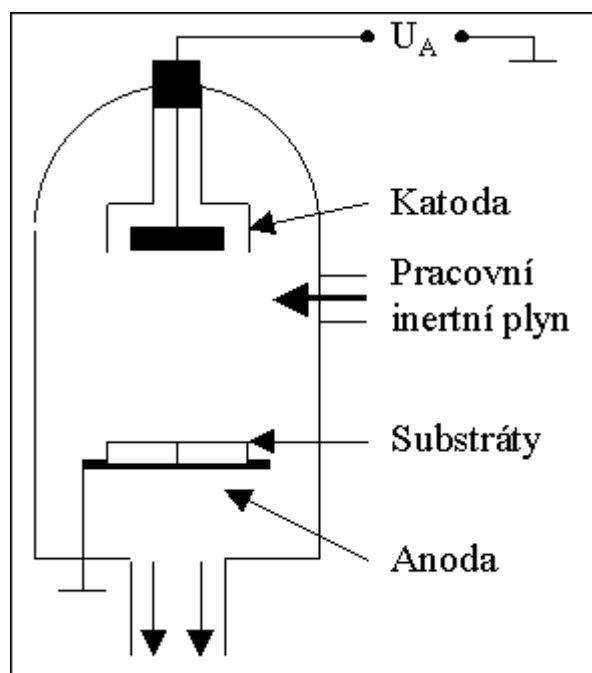
$$p \approx \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{\lambda}\right) \right] \quad (4)$$

kde p pravděpodobnost, že se částice dostane z výparníku na podložku
 d vzdálenost výparníku a podložky [m]
 λ střední volná dráha molekuly [m] – nepřímo úměrná hustotě molekul v plynu

Nejčastěji napařovaný materiál je hliník, mezi další často používané materiály patří zlato, chrom, titan, stříbro, nikl a jejich různé sloučeniny.

4.2.2.2 Napařování

Další technologií používanou při vytváření tenkých vrstev je napařování. Princip spočívá v mechanismu přenášení materiálu z katody na anodu při doutnavém výboji v plynech. Jako u napařování i zde je třeba vyčerpát prostor vývěvami, abychom dosáhli vakua. Změna oproti napařování je, že poté je do komory, kde děj probíhá, napuštěn ještě inertní plyn jako například: helium, neon, argon atp. ale třeba i kyslík pro vytváření různých oxidů. Poté co je na katodu a anodu přivedeno stejnosměrné napětí, vznikne mezi nimi katodový spád – potenciál mezi elektrodami není rozložen rovnoměrně, ale u katody je velice strmý. Zde jsou ionty inertního plynu urychlovány a vyráží z katody částice materiálu. Tyto částice se pak usazují na anodě, kde je umístěn substrát, na kterém má vznikat požadovaná vrstva. Náčrt napařovacího zařízení vidíme na dalším obrázku.



Obr. 7 Katodové napařování (Adámek)

Katodové naprašování má oproti napařování určité výhody. Mezi ně patří například to, že tato technologie umožňuje vytvářet rovnoměrnější vrstvy a to i na svislých plochách a také to, že je možné provádět reaktivní naprašování. Rychlost s jakou naprašování probíhá je možno vyjádřit vztahem:

$$Q = \frac{k \times U_i}{p \times d}$$

kde	k	konstanta úměrnosti
	U_i	pracovní stejnosměrné napětí [V]
	p	tlak [Pa]
	d	vzdálenost mezi katodou a anodou [m]

Naprašovat lze i jinými způsoby, např. magnetronovým naprašováním.

Napařování a naprašování se věnuje ještě praktická část této práce a proto zde je uveden jen velice stručný popis jednotlivých technik. V praktické části bude uvedeno jak vypadaly aparatury, které byly použity a také postup vytváření vzorků.

4.2.2.3 EBPVD

Fyzikální depozice elektronovým svazkem funguje na principu, že odpařovaný materiál je zapojen jako anoda a jeho povrch je bombardován elektronovým svazkem, díky kterému se materiál odpařuje. Terč, ze kterého je materiál odpařován, je umístěn blízko podložce, a proto není nutné zde dosahovat vysokého vakua.

4.2.2.4 PLD

Pulsní laserová depozice funguje na podobném principu jako EBPVD ale materiál je bombardován pulsní laserovým svazkem. Tímto způsobem materiál získá dostatečnou energii, přemění se na plazmu a vypaří se na požadovanou plochu. Nevýhodou obou těchto metod je to, že není možné je provádět na větší ploše a homogenita vrstva není tak dobrá jako u ostatních způsobů.

4.2.2.5 MBE

Epitaxe molekulárními svazky umožňuje růst velice tenké vrstvy (až atomárních rozměrů) monokrystalických materiálů. Materiály je možné odpařovat z různých skupenství a poté je soustředěn do svazků, ve kterých dopadá na substrát. Proces musí probíhat ve velmi vysokém vakuu a je pomalý ale je možné díky němu vytvořit vrstvu o velké čistotě a s malou tloušťkou.

4.3 Vlastnosti tenkých vrstev a jejich měření

Kvalita tenkých vrstev se dá posuzovat z několika různých hledisek a vždy to záleží na konkrétním využití. Stejně tak vlastností, které tenké vrstvy mají je spousta. Některé z nich byly v této práci zmíněny již dříve např. v Tab. 3. V dalších podkapitolách budou zmíněny další vlastnosti a to hlavně z mechanického hlediska.

4.3.1 Tloušťka

Tloušťka je asi nejdůležitější vlastnost tenké vrstvy, protože lze říci, že skoro všechny vlastnosti tenké vrstvy na ní záleží. Tloušťka se pohybuje v rozmezí několika nanometrů až několika mikrometrů podle toho, jakým způsobem a za jakých podmínek byla vrstva vytvořena. Měření tloušťky vrstev je značně složité, protože vrstva není naprosto homogenní a má na různých místech různou tloušťku. Lze tedy například proměřit vrstvu na velkém množství míst a pak určit průměrnou tloušťku nebo určit „hmotovou tloušťku“ tím, že zjistíme, kolik vrstva váží, jakou má materiál měrnou hmotnost a její šířku a délku. V následujících podkapitolách budou uvedeny různé metody měření tloušťky.

4.3.1.1 Váhové metody měření

Váhu tenké vrstvy je možné měřit pomocí mikrováhy s dostatečnou citlivostí (jednotky 10^{-8} g/cm²). Nejpoužívanější je Mayerova mikrováha, která funguje tak, že na jedné straně váhy je umístěna podložka na kterou se napařuje a na druhé magnet a cívka, díky kterým se proudem kompenzuje výchylka způsobena napařením. Toto měření je možné provádět již při výrobě a tloušťka se poté vypočte ze vztahu:

$$t = \frac{m}{S \times \rho}$$

kde	t	tloušťka vrstvy [m]
	m	hmotnost [kg]
	S	obsah [m ²]
	ρ	měrná hmotnost [kg/m ²]

Další možností je dynamické vážení, které používá kmitající křemenný krystal. Krystal je vybroušený a zapojený do oscilačního obvodu. Na každém konci má jednu elektrodu a na jednu z nich se napařuje vrstva. Frekvence kmitání krystalu se mění podle tloušťky krystalu. Tomuto vztahu odpovídá rovnice:

$$f = \frac{N}{t}$$

kde	f	frekvence krystalu [Hz]
	N	frekvenční konstanta [nejčastěji kHz.mm]
	t	tloušťka krystalu [m]

Pro dopočítání přírůstku hmotnosti slouží složitější rovnice, které nebudou v této práci uvedeny. Pomocí této metody je možné dosáhnout přesnosti až 10^{-12} g/cm².

4.3.1.2 Elektrické metody měření

První z elektrických metod je měření elektrického odporu. Je velice jednoduchá ale ne vždy použitelná. Tím, že vrstvy, zvláště při menších tloušťkách, nejsou homogenní, je znemožněno takto měřit všechny vrstvy. Navíc směrem ke krajům vrstvy se většinou odpor také mění. Při větších tloušťkách vrstvy je ale tato metoda

vhodná právě pro svou jednoduchost. Funguje na principu, kdy je vrstva zapojena jako jedno rameno Wheatstonova můstku a díky proměnnému odporu je možné určit odpor vrstvy. Ten lze určit s velkou přesností až na setiny procent ale při přepočtu odporu vrstvy na tloušťku je přesnost velice malá a nepřesnosti dosahují 5%.

Další možností je měřit kapacitu vrstvy. Zde jsou dvě možnosti. První z nich je, že na kapacitní můstek jsou připojeny dvě elektrody a na ně je nanášena vrstva a tím se změní měřená kapacita. Druhá možnost je použitelná až u hotových vrstev a ta funguje tak, že nanášená vrstva je pokryta vrstvou kovu a tím vlastně vznikne rovinný kondenzátor, jehož kapacitu jsme schopni změřit. Ani jedna z těchto metod také není moc přesná.

Poslední metodou používající můstkové zapojení je měření pomocí změny kvality cívky. V můstku je zde zapojena cívka, která je ve velmi malé vzdálenosti od vrstvy a probíhá jí střídavý proud. To má za následek, že ve vrstvě se ztrácí část energie a tak se mění kvalita cívky a její rezonanční frekvence. Tím se poruší rovnováha můstku, v jehož diagonále vznikne proud, který jsme schopni změřit.

A úplně poslední elektrickou metodou měření tloušťky je metoda ionizační. Ta funguje tak, že nanášený materiál je zionizován a je možné změřit iontový proud, z něhož lze zjistit rychlost vypařování a za předpokladu, že veškerý materiál zkondenzuje na podložce, je možné zjistit tloušťku.

4.3.1.3 Optické metody měření

První možností jak měřit tloušťku vrstvy pomocí optických metod je měření koeficientu absorpce světla, která je založena na vztahu:

$$I = I_0 \times (1 - R)^2 \times \exp(-\alpha \times t)$$

kde	I	intenzita po průchodu [W/m ²]
	I ₀	počáteční intenzita [W/m ²]
	R	koeficient odrazu [-]
	α	koeficient absorpce [-]
	t	tloušťka vrstvy [m]

Výhodou této metody je hlavně její jednoduchost a také to, že je možné ji použít již při vytváření vrstvy.

Druhý způsob využívá jevu interference na tenkých vrstvách. Pokud na tenkou vrstvu dopadá světlo o jedné frekvenci, rozloží se do dvou různých vln, které společně vytvářejí interferenční maximum a interferenční minimum ze kterých lze určit pomocí několika vzorců. Tyto vzorce jsou složitější a stejně tak celá problematika týkající se interference a proto nebude v této práci probrána více.

Posledním možností je elipsometrická metoda, která se využívá hlavně u velmi tenkých vrstev. Při této metodě se měří amplituda odraženého světla polarizovaného v

rovině dopadu a světla polarizovaného kolmo k rovině dopadu. Z jejich poměru pak pomocí složitých elektromagnetických rovnic lze vypočítat tloušťku vrstvy.

4.3.1.4 Dotykové a bezdotykové metody snímání profilu

Tyto metody jsou založené na tom, že nanosená vrstva tvoří na substrátu určitý „schod“ a díky těmto metodám je možné určit profil celé podložky i s vrstvou a určit jejich rozdíl a tím tloušťku vrstvy. Více o tomto bude v praktické části v kapitole

4.3.2 Adheze

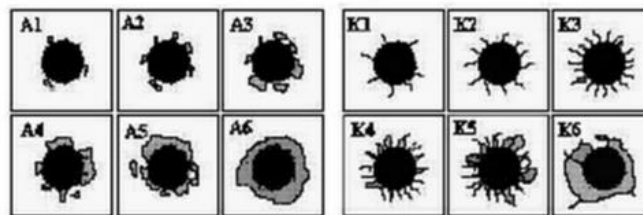
Adheze je další s velice důležitých parametrů kvality výsledné vrstvy. Jedná se vlastně o přilnavost vrstvy k substrátu. Může být způsobena několika různými vazbami: elektrostatickou silou, chemickou reakcí mezi vrstvou a substrátem nebo van der Waalsovými silami. Jak velká výsledná adheze bude záleží hlavně na materiálu vrstvy a substrátu, hladkosti povrchu substrátu, způsobu jak byla vrstva vytvořena⁴ a ještě dalších podmínkách za kterých byla vrstva vytvořena. Jak dobrá je adheze vrstvy lze zjistit několika způsoby, které budou uvedeny v dalších podkapitolách.

4.3.2.1 Scratch test

Jedná se o nejrozšířenější test adheze, jinak nazývaný také vrypová zkouška. Princip spočívá v tom, že vzorek se horizontálně pohybuje a na vrstvu působí s lineárně se zvětšující silou indentor⁵. Při tom se sleduje, kdy se vrstva odtrhne od substrátu a tím je určena míra adheze.

4.3.2.2 Mercedes test

Funguje na podobné principu jako Scratch test. Také je zde indentor, který je zatlačován do vrstvy, ta je ale v tomto případě statická. Míra adheze se poté hodnotí podle toho jak moc je vrstva odloupenutá nebo popraskaná. Ukázka je vidět na Obr. 8.



Obr. 8 Hodnocení porušení okolí vtisku vytvořeného Rockwellovým indentorem při 1500N (ATeam, 2005)

⁴ např. částice, které dopadají na podložku při naprašování mají mnohem větší energii než částice napařované a více „pronikají do povrchu“

⁵ těleso z dostatečně tvrdého materiálu

4.3.2.3 Další způsoby testování adheze

Dalším způsobem jak otestovat adhezy vrstvy je odtrhávací zkouška. Jsou zde dvě možnosti. První je klasická odtrhávací, kdy se vrstva přilepí k trhačce a měří se odtrhávací síla. Je důležité, aby trhačka působila v kolmém směru na vrstvu. Druhá možnost je zkouška smykem, která funguje na stejném principu jako předchozí jen působí ve směru vodorovném k vrstvě.

Vcelku rozšířenou metodou je také zkouška mřížkovým řezem a to hlavně proto, že se dá dobře vyhodnotit. Princip spočívá v tom, že se vrstva rozřeže na síť čtverců, které mají několik standardizovaných velikostí. Poté se pozoruje kolik čtverců se odlouplo, jak vypadá řez apod.

4.3.3 Homogenita

Je žádoucí, aby vrstva byla co nejvíce homogenní, tj. aby byla na všech místech stejná. To je ale v podstatě nereálný stav a určitá úroveň nehomogenity se vyskytuje vždy. U tenkých vrstev, které se používají pro elektrotechnické aplikace je třeba tuto vlastnost sledovat pro to, že když by na některých místech vzorku vůbec nebyla vrstva materiálu, tak by se výrazně zvýšil odpor.

Homogenitu lze zjišťovat například dotekovou metodou, tak jak bylo uvedeno v 4.3.1.4, kdy se sejme profil povrchu ze kterého lze vidět jak pravidelně je materiál rozložen. Dalšími možnostmi jsou optické přístroje – od obyčejných mikroskopů až po nejnovější zařízení AFM.

4.3.4 Vodivost

Tato vlastnost popisuje schopnost dané vrstvy vést proud. To je důležité hlavně při využití tenkých vrstev v elektrotechnice, kde tento parametry bude skoro nejdůležitějším. Čím větší vodivost, tím lépe je vrstva schopna vést proud a tudíž tím menší má odpor. Proto je vodivost nejlepší měřit některými metodami proměňování elektrického odporu a poté vypočíst převrácenou hodnotu pomocí vztahu:

$$G = \frac{1}{R} \quad (5)$$

kde G vodivost [S]
R odpor [Ω]

4.4 Využití tenkých vrstev

Tenké vrstvy mají mnoho využití jak v elektrotechnice tak mimo ní a proto v této práci bude uvedeno jen několik zajímavých či důležitých aplikací, kde se tato technologie používá.

4.4.1 Mimo elektrotechniku

Aplikace tenké vrstvy, která je známá skoro každému, je antireflexní vrstva na brýlích. Ta má za úkol odrážet paprsky světla a zlepšovat vidění přes brýle. Vrstva musí mít definovanou tloušťku takovou, aby byly vrstvy posunuty o půl vlnové délky.

Další využití je nanášení diamantové vrstvy na povrch vrtacích a řezných nástrojích, čímž se zvyšuje jejich tvrdost.

4.4.2 Elektrotechnika

V elektrotechnice mají tenké vrstvy velice široké využití. Je možné pomocí nich vyrábět pasivní struktury. Těmi jsou myšleny například vodivé cesty, rezistory, kondenzátory nebo cívky. Je možné je vyrobit velice přesně. Výroba jednotlivých součástí je velice komplexní a proto jí zde nebude věnována větší pozornost. Také je možné pomocí tenkých vrstev nanést kontakty na polovodičové čipy. Další zajímavou možností využití jsou například některé funkční vrstvy na displejích.

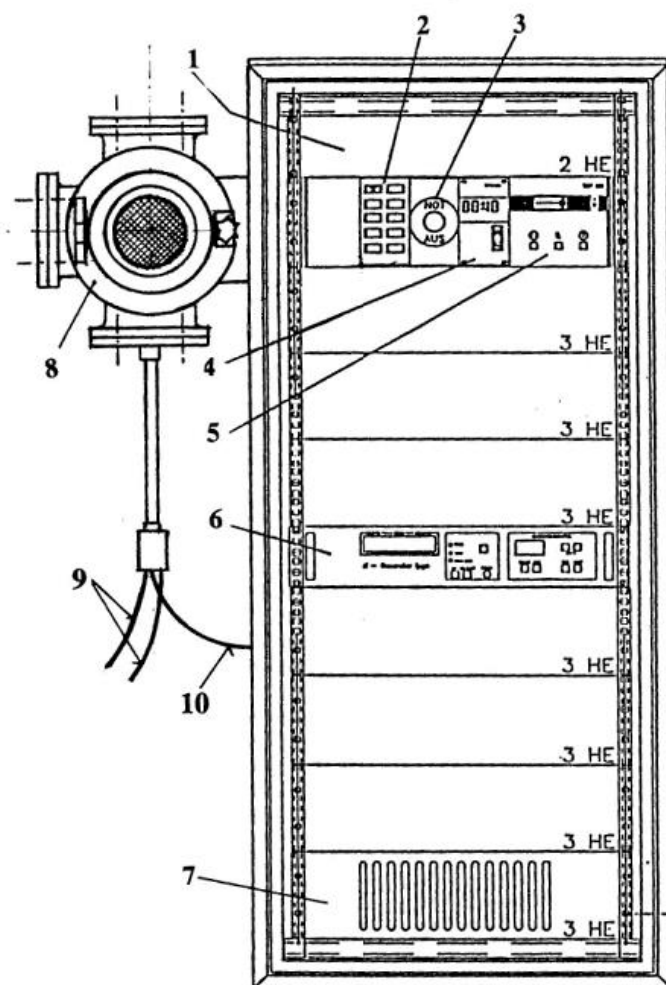
5 Výroba vzorků a jejich proměření

5.1 Použité přístroje

5.1.1 Naprašovačka

Zařízení, které jsme použili pro naprašování je od výrobce Balzers Pfeiffer. Skládá se z recipientu⁶, ovládacího panelu, generátoru a planárního magnetronu. Do recipientu se vloží terč materiálu, který chceme naprášit a podložku na kterou se bude naprašovat. Ta je zakryta maskou v požadovaném tvaru. Poté je recipient uzavřen a začíná čerpání prostoru. To zajišťuje membránová vývěva, která recipient předčerpá a poté je recipient dočerpán turbomolekulární vývěvou, kterou je možné dosáhnout tlaku až 10⁻⁹ Pa. Když je prostor dostatečně vyčerpán na jednotky Pa, tak se do něj napustí pracovní plyn, v našem případě argon s kterým se snažíme dosáhnout tlaku 2 kPa, který je nutný držet konstantní po celou dobu naprašování. Poté se zapne generátor a nastaví se požadovaný výkon. Je třeba hlídat odražený výkon, který by měl být co nejmenší. Když je vrstva naprášena generátor se vypne a recipient se začíná pomalu zavzdušňovat.

⁶ nádoba ve které je možné uchovávat vakuum



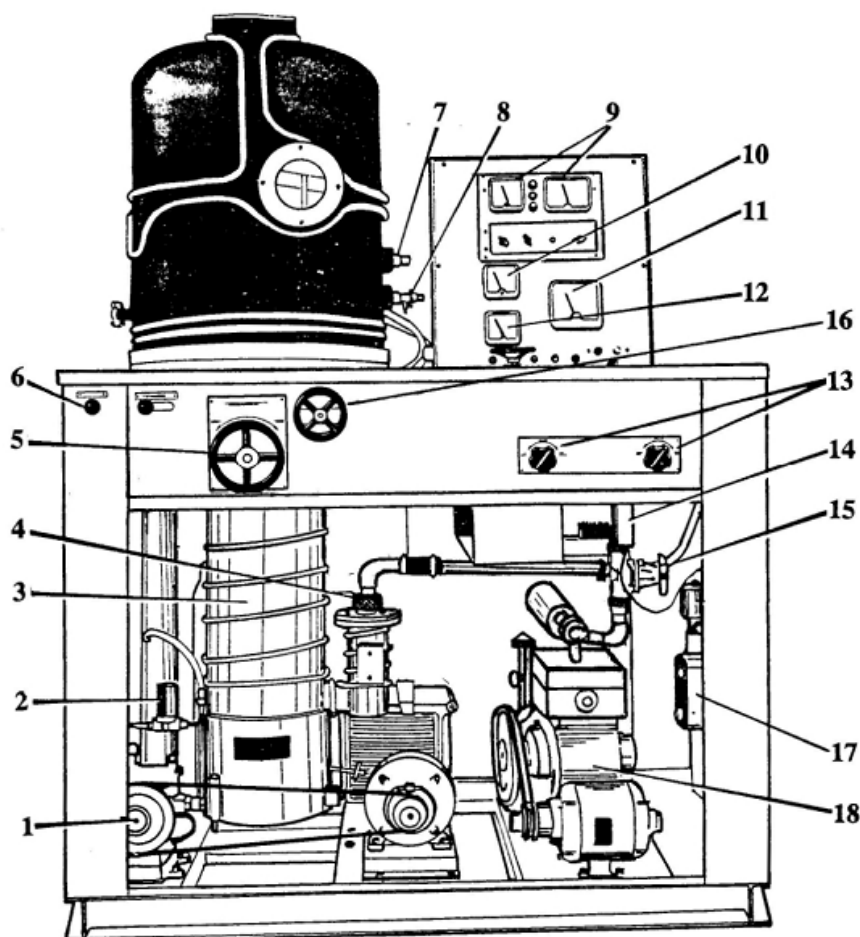
- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1 Odvětrávací prostor | 6 Vysokofrekvenční generátor |
| 2 Indikace průtoku chladicí vody,
tlačítko ovládání škrťacího ventilu | 7 Zesilovač vysokofrekvenční energie |
| 3 Hlavní vypínač | 8 Recipient |
| 4 Měření vakua v širokém rozsahu | 9 Přívod a odvod chladicí vody |
| 5 Ovládání turbomolekulární vývěvy | 10 Přívod vf výkonu |

Obr. 9 Použitá naprašovačka (Koblížek)

5.1.2 Napařovačka

Pro napařování bylo použito zařízení firmy Edwards, které se skládá z recipientu, panelu měření a ovládání, rotační vývěvy a difusní vývěvy. Do recipientu se nejdříve vloží podložka a požadovaná maska, kterou je možné i otáčet a tím vytvářet vícevrstvé struktury bez nutnosti přendání masky a opětovného čerpání recipientu. Také je třeba umístit odpařovaný materiál do odparníku. Poté je prostor uzavřen a začíná odčerpávání pomocí rotační vývěvy, díky které je možné dosáhnout tlaku v jednotkách

Pa. Po dosáhnutí tohoto tlaku probíhá iontové čištění⁷ a nečistoty jsou ještě odsáty rotační vývěvou. Pak se připojí difuzní vývěva s kterou je možné dosáhnout tlaku až v řádech jednotek mPa. V následujícím kroku je přiveden velký proud do odpařníku a díky tomu se materiál odpařuje. Tento krok je možné opakovat podle toho, kolik vrstev potřebujeme nanést. Nakonec je prostor zavzdušněn a je možné vzorek vyjmout.



- | | |
|---|---|
| 1 Hydraulické čerpadlo pro zvedání recipientu | 10 Měření proudu při čištění výbojem |
| 2 Magnetický ventil pro spuštění recipientu | 11 Měření proudu odpařovacího zdroje |
| 3 Difuzní vývěva | 12 Měření teploty uvnitř recipientu |
| 4 Výstup difuzní vývěvy | 13 Ventil předčerpání a čerpání difuz. vývěvy |
| 5 Ovládání deskového ventilu | 14 Piraniho měrka vakua |
| 6 Clona odpařovacího zdroje | 15 Uzavírací ventil pro test netěsností |
| 7 Napouštěcí ventil recipientu | 16 Přepínač odpařovacích zdrojů |
| 8 Jehlový napouštěcí ventil recipientu | 17 Startér rotační vývěvy |
| 9 Pirani-Penningův vakuoměr | 18 Rotační vývěva |

Obr. 10 Použitá napařovačka (Koblížek)

⁷ čištění pomocí doutnavého výboje

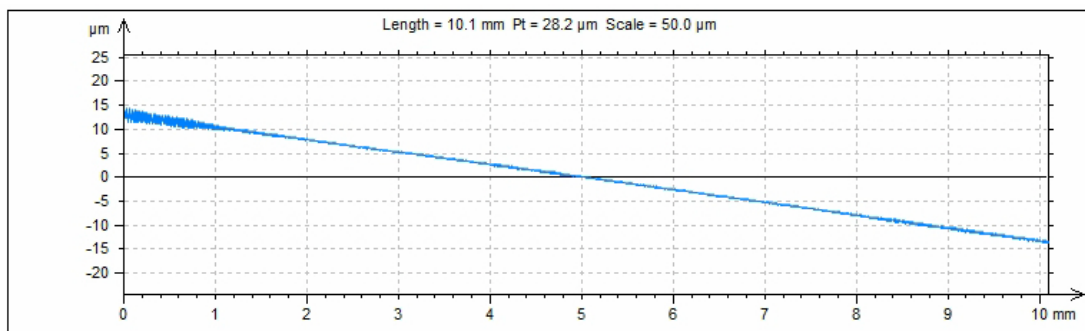
5.1.3 Talysurf

Toto zařízení jsme použili k měření tloušťky vrstvy, její drsnosti a v některých případech i k proměření profilu vzorku a nebo podložky. Na Obr. 11 je vidět z čeho se celý přístroj skládá.

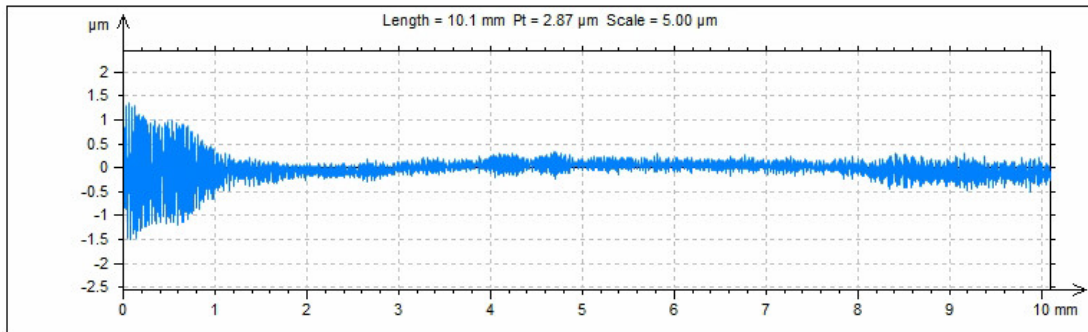


Obr. 11 Foto pracoviště a popis talystepu

Jako první je třeba přístroj nakalibrovat a spustit program pro jeho obsluhu Taylor Hobson ultra. Poté se vzorek umístí na podložku a raménkem se najede na místo, odkud se začne měření. Zde je třeba dojet hrotem co nejbližší k podložce ale na zase moc na těsno, aby se hrot nepoškodil (indikaci je možné sledovat na počítači v okně programu). V dalším kroku se nastaví parametry jako např. jakou vzdálenost má hrot ujet a program je spuštěn. Po změření je vytvořen soubor s naměřenými výsledky, který můžeme vyexportovat a otevřít pomocí programu Taly Profile Gold, který nám umožňuje naměřené výsledky upravit a dostat z nich údaje, které potřebujeme.

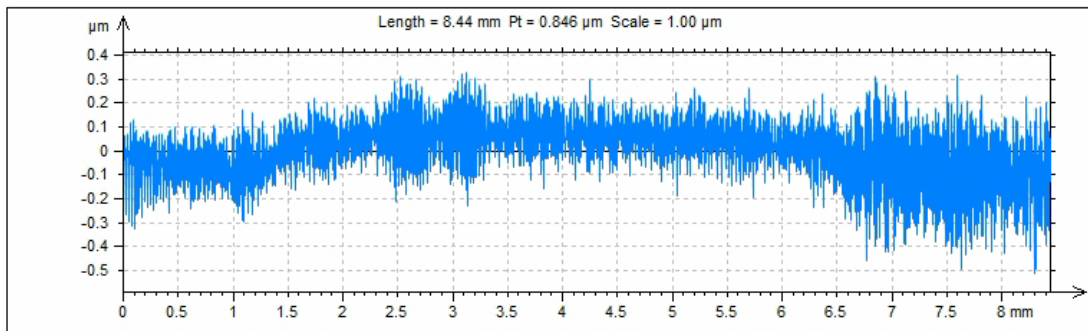


Obr. 12 Sejmутý profil po otevření v programu Taly Profile Gold

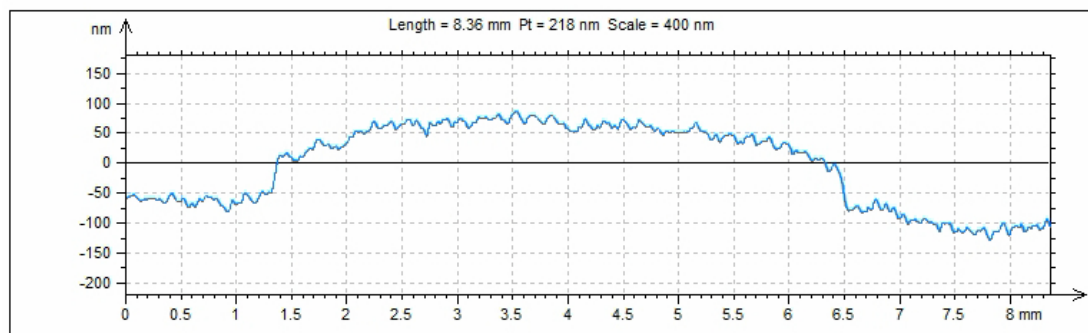


Obr. 13 Vyrovnaný profil pomocí funkce leveling

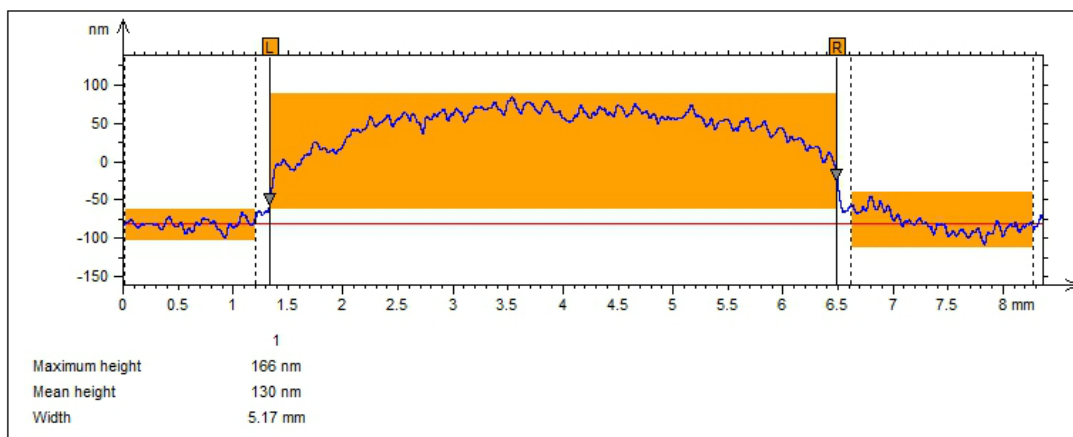
Na Obr. 13 nelze rozeznat vrstvu moc dobře a to hlavně kvůli tomu, že na začátku očividně proběhli nějaké silné otřesy. V některých případech, jak například tady, kde otřesy jsou mimo měření vrstvy, je možné profil oříznout a získat smysluplný výsledek. Tam, kde to nejde, je nutné měření opakovat.



Obr. 14 Vyrovnaný a oříznutý profil



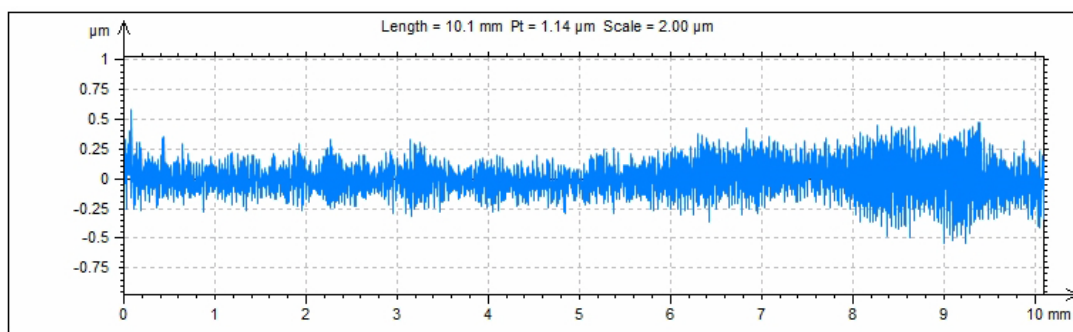
Obr. 15 Vyfiltrovaný průběh profilu



Obr. 16 Proměřená tloušťka vrstvy

Nakonec se změřila tloušťka vrstvy, což bylo provedeno tak, že podložka na obou stranách se označila jako referenční výška a od ní se měřila tloušťka vrstvy.

Bylo možné také změřit drsnost povrchu, což se provedlo tak, že se projel profil vzorku tam, kde jsme chtěli měřit drsnost a poté program dokázal vyhodnotit různé parametry. Pro nás byl důležitý parametr R_a , neboli průměrná drsnost.



Obr. 17 Sejmутý profil pro měření drsnosti

ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	0.336	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rv	0.322	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rz	0.658	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rc	0.334	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rt	1.03	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Ra	0.100	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rq	0.122	μm	Gaussian filter, 0.8 mm
Rsk	0.0459		Gaussian filter, 0.8 mm
Rku	2.58		Gaussian filter, 0.8 mm
Material Ratio parameters - Roughness profile			
Rmr	100	%	c = 1 μm under the highest peak, Gaussian filter, 0.8 mm
Rdc	0.212	μm	p = 20%, q = 80%, Gaussian filter, 0.8 mm

Obr. 18 Vyhodnocovací tabulka drsnosti

V případě naprášených vrstev jsme proměřovali vrstvu na obou krajích (body od sebe vzdálené 4 cm), ve středu a pak také na místě, kde už se vrstva „ztrácí“. Pokud to

bylo možné proměřil se také náběh z boku. Na prvních vzorcích se proměřovala drsnost skla (která se nijak zvlášť neliší) a u většiny vzorků i drsnost vrstvy.

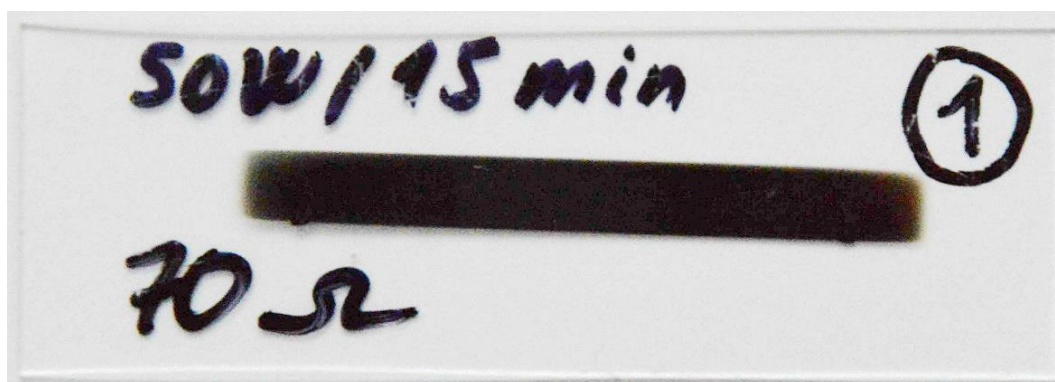
U napařených vrstev se vzorek proměřoval na sedmi místech vzdálených od sebe 1 cm a vzhledem k tomu, že by vrstva měla být po celé délce konstantní, tak jsme neměřili náběh.

5.2 Vyrobené vzorky

5.2.1 Naprášené / sklo / 50 W / 15 minut

Jako první jsme vzorky naprašovali, tak se dělo za výkonu 50 W a vzorky byli exponovány pod dobu 10 minut. Tímto způsobem byli vytvořeny tři vzorky, aby byla vyloučena chyba nanášení. Jak se později zjistilo, první vzorek byl ovlivněn tím, že zařízení nebylo dlouho používáno a nebyli jsme schopni držet konstantně výkon s co nejmenším odraženým výkonem. Proto se tento vzorek ve výsledcích liší od ostatních dvou a jako správné výsledky jsou brány druhé dva vzorky.

5.2.1.1 1

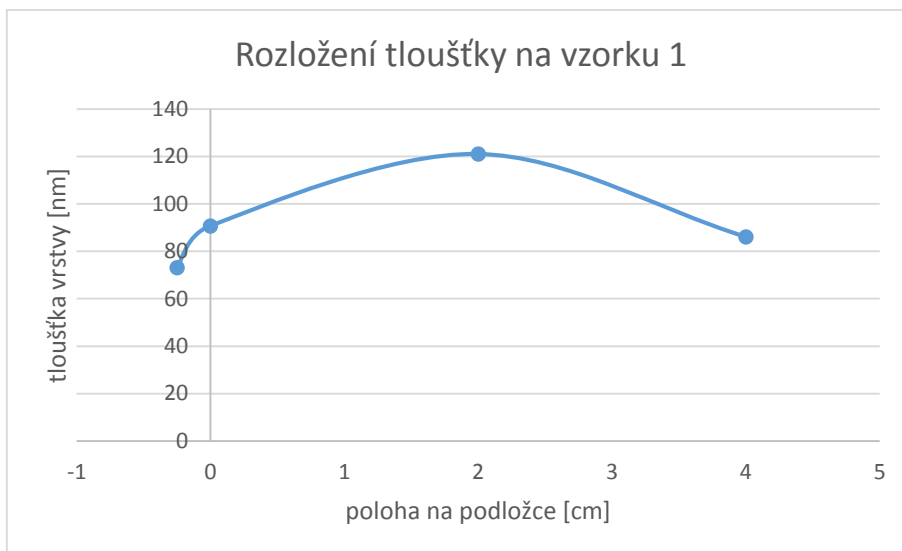


Obr. 19 Foto vzorku 1

Změřili jsme odpor naprášené vrstvy a zjistili jsme, že ten je 70 Ω . Poté jsme vrstvu proměřili na přístroji Talysurf, kde jsme zjišťovali její tloušťku a také drsnost povrchu. V Tab. 5 vidím rozložení tloušťky vrstvy na podložce. Poloha bodů, kde byla tloušťka měřena je vidět na Obr. 19. Jeden vyznačený bod je brán jako referenční, další je měřen 4 cm od něj, třetí je měřen ve středu a poslední kousek před referenčním. Již na fotce je vidět, že ke kraji je vrstva velice slabá, až se ztrácí. Tomu odpovídají i naměřené hodnoty, kdy mezi bodem 0 a bodem 2 je rozdíl vzdálenosti 2 cm a rozdíl v tloušťce je 30,3 nm a poté na čtyřikrát menší vzdálenosti 0,25 cm, která je mezi bodem -0,25 a 0 je rozdíl více jak poloviční a to 17,5 nm. Lepé je tento jev interpretován v Graf 1.

Tab. 5 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 1

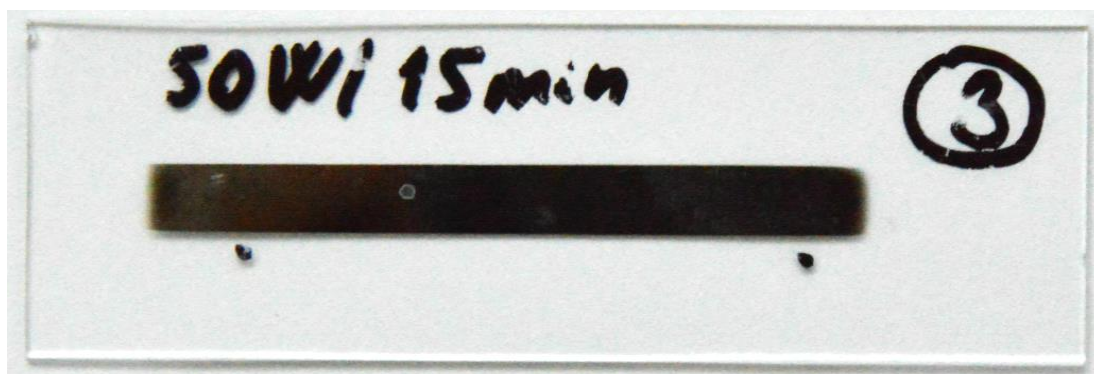
poloha na podložce [cm]	-0,25	0	2	4
tloušťka vrstvy [nm]	73,2	90,7	121	86,1



Graf 1 Rozložení tloušťky na vzorku 1

Také byla naměřena drsnost této vrstvy, které byla průměrně 49,8 nm. Z toho vyplývá, že částice „vyplnily“ nerovnosti skla a je tato vrstva ještě hladší než sklo. Náběh vrstvy se nepodařilo naměřit kvůli prohnutí podložky.

5.2.1.2 3

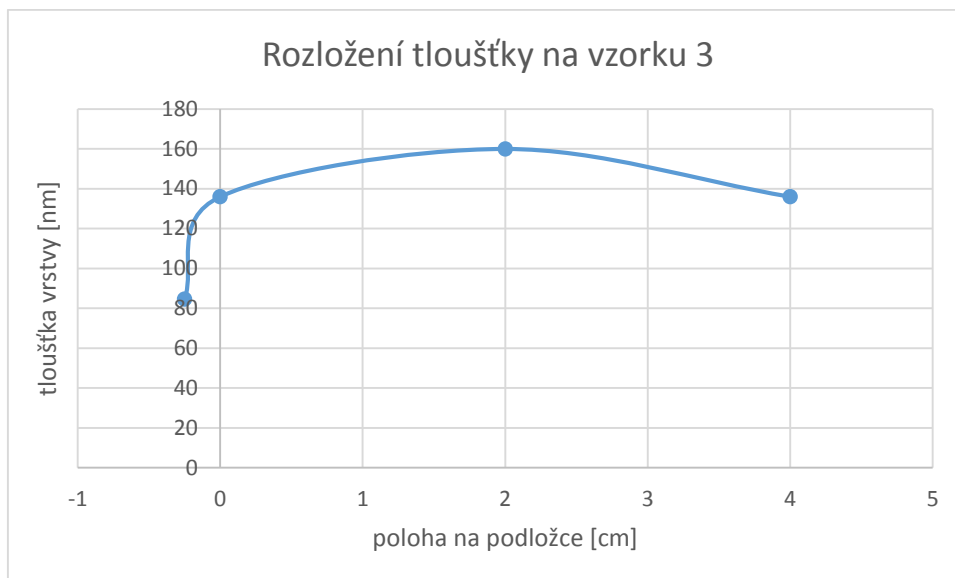


Obr. 20 Foto vzorku 3

U této vrstvy se měřili stejné parametry jako u předchozí. Jak je vidět, tak vrstva byla silnější, což bylo zapříčiněno tím, že v případě první vrstvy běžela naprašovačka po dlouhé době a proto proces nebyl zcela korektní. I odpor vyšel menší a to 20 Ω, což odpovídá tomu, že je vrstva silnější.

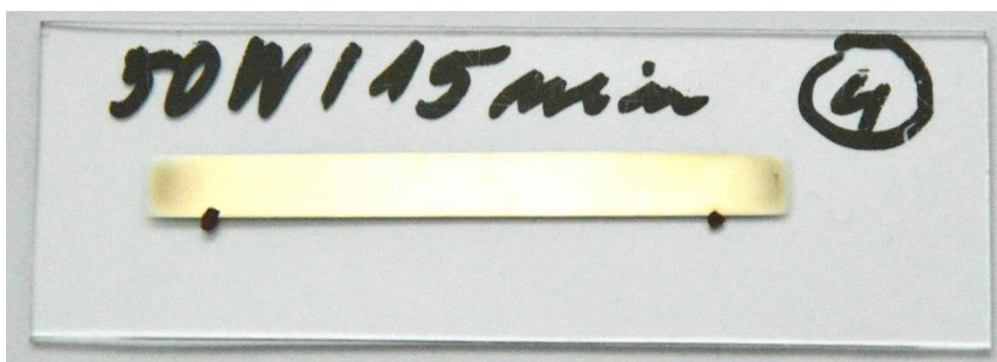
Tab. 6 Rozložení tloušťky na vzorku 3

poloha na podložce [cm]	-0,25	0	2	4
tloušťka vrstvy [nm]	84,7	136	160	136



Graf 2 Rozložení tloušťky na vzorku 3

5.2.1.3 4

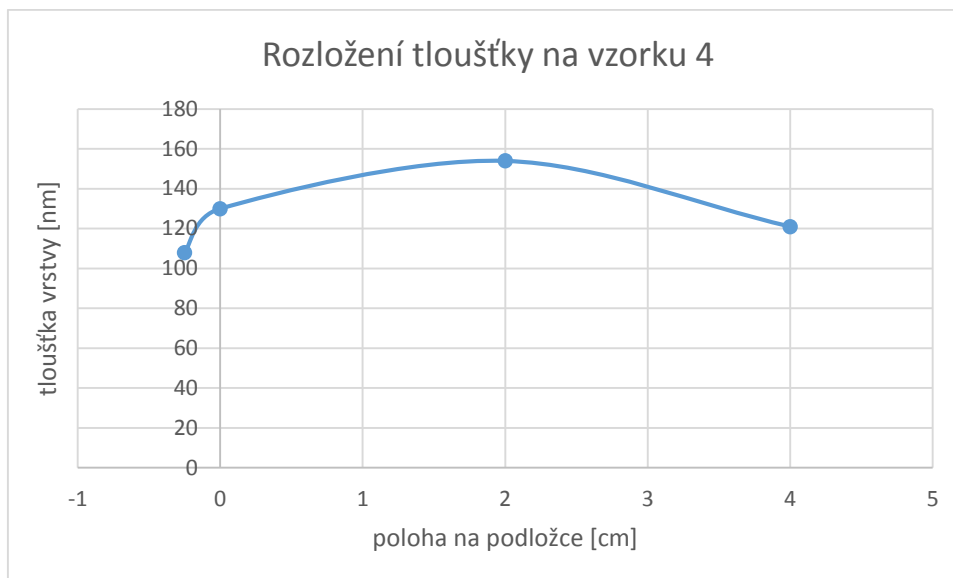


Obr. 21 Foto vzorku 4

Tato vrstva se dělala pro kontrolu, abychom věděli, jaké výsledky jsou správné, jestli ze vzorku 1 nebo 3. Dle naměřených výsledků jsme zjistili, že odpovídající vzorek je 3, od kterého se tento nijak zvlášť neliší. I odpor vyšel velice podobný a to 12Ω .

Tab. 7 Rozložení tloušťky na vzorku 4

poloha na podložce [cm]	-0,25	0	2	4
tloušťka vrstvy [nm]	108	130	154	121



Graf 3 Rozložení tloušťky na vzorku 4

5.2.2 Naprášené / korund / 50 W / 15 minut

Další kombinace, kterou jsme vyzkoušeli probíhala za stejných podmínek jako ta předchozí ale materiál byl místo skla korund. Tento kousek korundu byl jen broušený a ne leštěný nebo glazovaný, a proto pro potřeby výroby hybridních integrovaných obvodů naprosto nevhodný. Za to se na něm dá sledovat vliv hladkosti podložky na konečnou vrstvu.



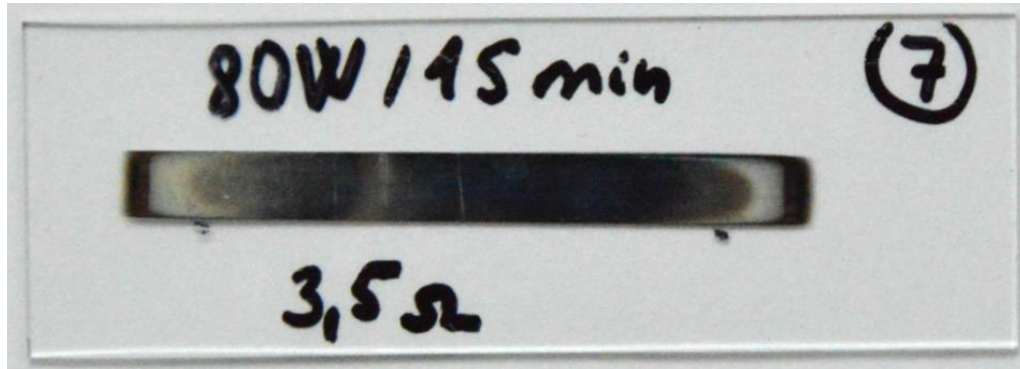
Obr. 22 Foto vzorku 2

Na fotce vidíme, že naprášené částice „zapadly“ do povrchu podložky a proto celá vrstva není moc výrazná. Poté jsme vrstvu opět proměřili přístrojem Talysurf. Nebylo úplně možné proměřit tloušťku vrstvy, protože ta v podstatě splývala s materiálem podložky. Mohli jsme ale proměřit drsnost povrchu samotného materiálu a drsnost povrchu nanesené vrstvy. Zatím co v případě samotného materiálu bez nanesené vrstvy byla drsnost povrchu 505 nm, tak v případě vrstvy to bylo jen 401 nm a tudíž měření ukazuje to, co jsme byli schopni pozorovat i okem, že částice hliníku vyplnily díry v materiálu. Z důvodu toho, že tato vrstva nebyla již od pohledu homogenní, tak jsme na ní neproměřovali odpor.

5.2.3 Naprášené / sklo / 80 W / 15 minut

Poslední kombinací, kterou jsme prováděli pomocí naprašování bylo opět nanášení vrstvy na sklo ale za zvýšeného výkonu z 50 W na 80 W. Tím by se měla zvýšit rychlost nanášení vrstvy a vrstva by měla být celkově nerovnoměrnější. Tímto způsobem byli připraveny tři vzorky, aby bylo možné vyloučit chybu při procesu.

5.2.3.1 7

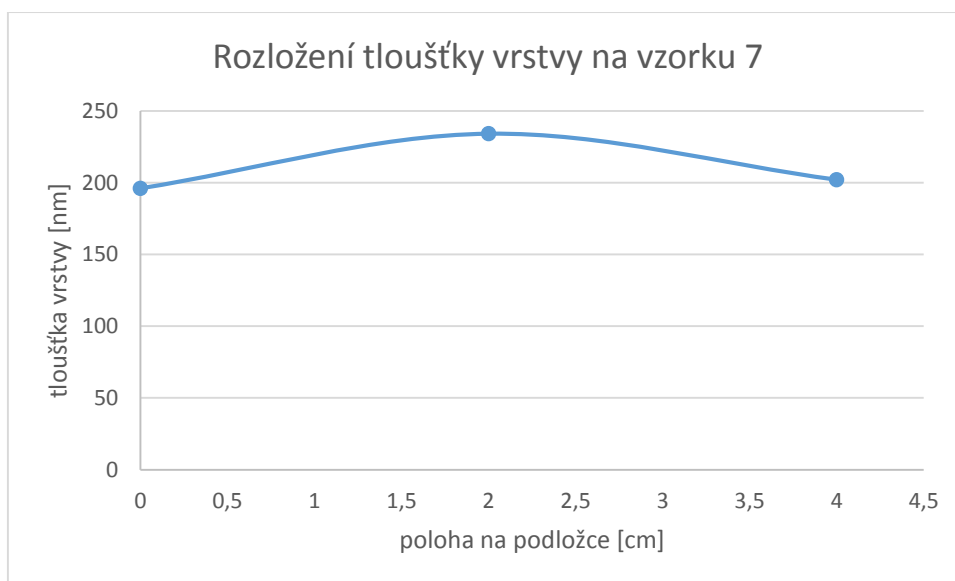


Obr. 23 Foto vzorku 7

Odpor vrstvy naprášené při výkonu 80 W byl $3,5 \Omega$ a jak vidíme v Tab. 8 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 7, tak i tloušťka celkové vrstvy je větší, což odpovídá vztahu (1).

Tab. 8 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 7

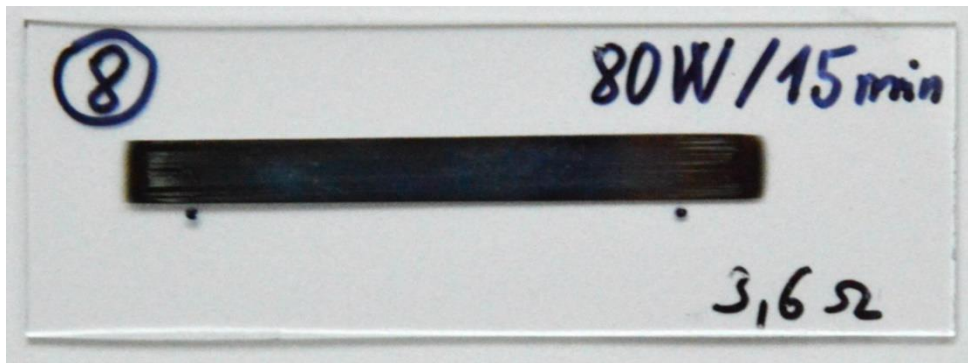
poloha na podložce [cm]	0	2	4
tloušťka vrstvy [nm]	196	234	202



Graf 4 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 7

Také jsme na tomto vzorku proměřili drsnost vrstvy, které byla 100 nm.

5.2.3.2 8

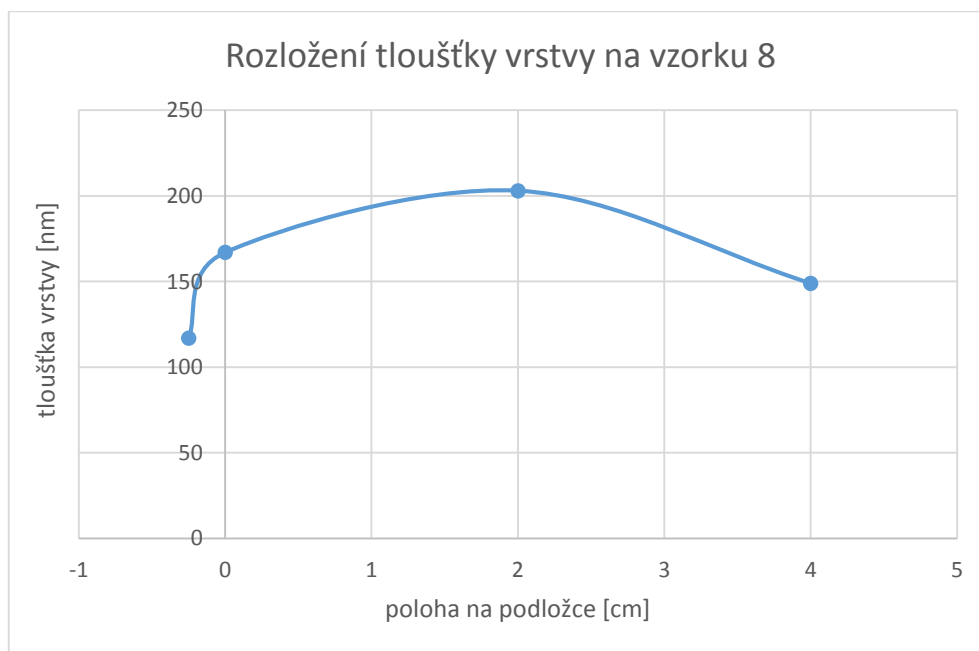


Obr. 24 Foto vzorku 8

V druhém případě byl odpor v podstatě totožný jako v prvním případě a to i přesto, že tloušťka vrstvy vychází menší. To může být způsobeno tím, že při takhle velkém výkonu a tudíž i velké rychlosti nanášení, je vrstva značně nerovnoměrná, a proto se místa, co jsme proměřovali, o tolik lišili.

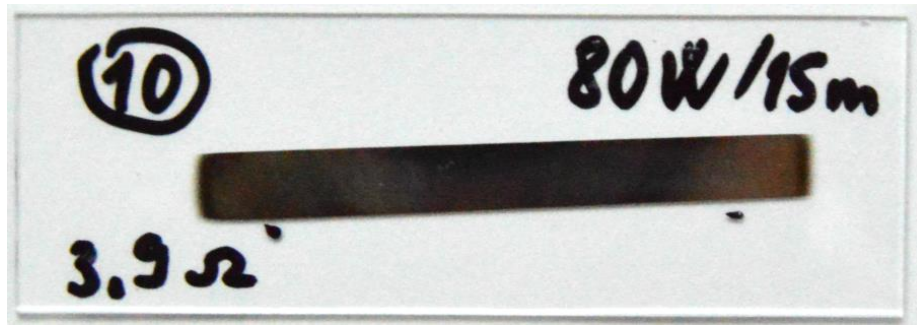
Tab. 9 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 8

poloha na podložce [cm]	-0,25	0	2	4
tloušťka vrstvy [nm]	117	167	203	149



Graf 5 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 8

5.2.3.3 10

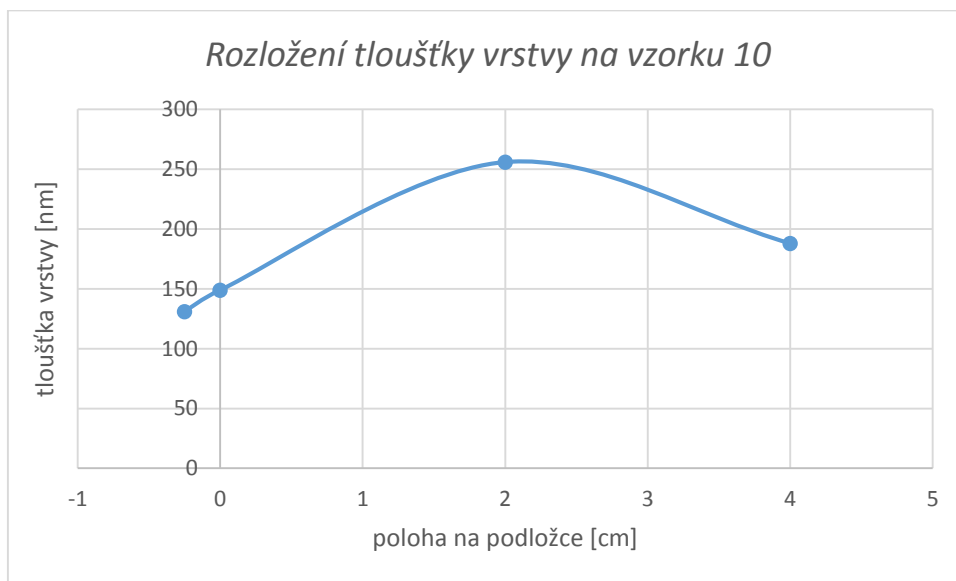


Obr. 25 Foto vzorku 10

To samé se dá říct i o tomto vzorku. Odpor má sice větší ale vyšly nám i proměřené profily tlustší, což bude opět pravděpodobně dáno tím, že vrstva je rozprostřena nerovně.

Tab. 10 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 10

poloha na podložce [cm]	-0,25	0	2	4
tloušťka vrstvy [nm]	131	149	256	188

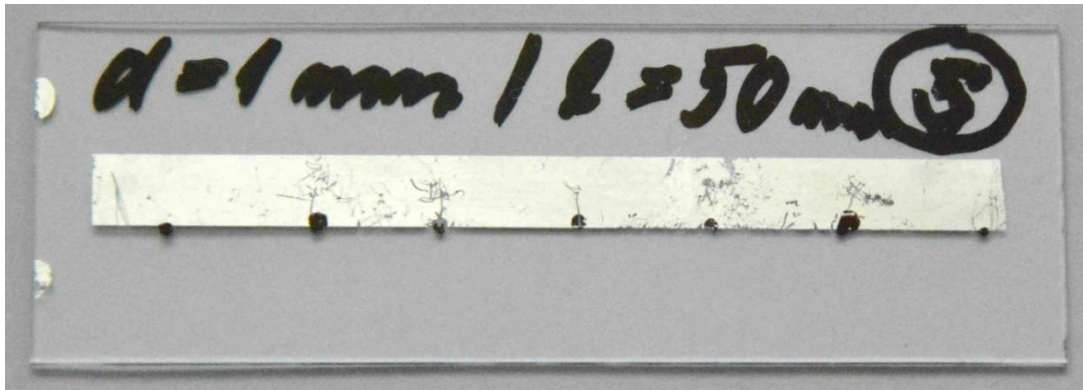


Graf 6 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 10

5.2.4 Napařené / délka 50 mm

Jako další se dělali vzorky napařováním a zkoumali se zde, jaký vliv má množství materiálu v odparníku na tloušťku vrstvy. Jako první byl použit drátek o průměru 1 mm a délce 50 mm.

5.2.4.1 5



Obr. 26 Foto vzorku 5

Jak je vidět na grafu, tloušťka není rozložena rovnoměrně, ale jsou tam určité výkyvy. To bude dáno asi nepřesností měření, protože při měření napařených vzorků byly velice nepříznivé okolní podmínky, které znemožnily přesné měření. Také se nepodařilo proměřit odpor vrstvy a to proto, že je vrstva mechanicky poškozená.

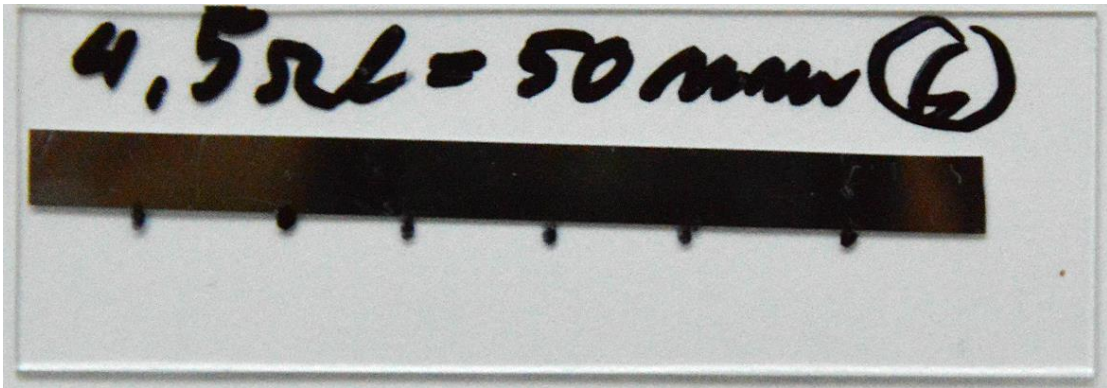
Tab. 11 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 5

poloha na podložce [cm]	0	1	2	3	4	5	6
tloušťka vrstvy [nm]	95,6	75,1	73,1	74,1	50,2	88,9	69,2



Graf 7 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 5

5.2.4.2 6

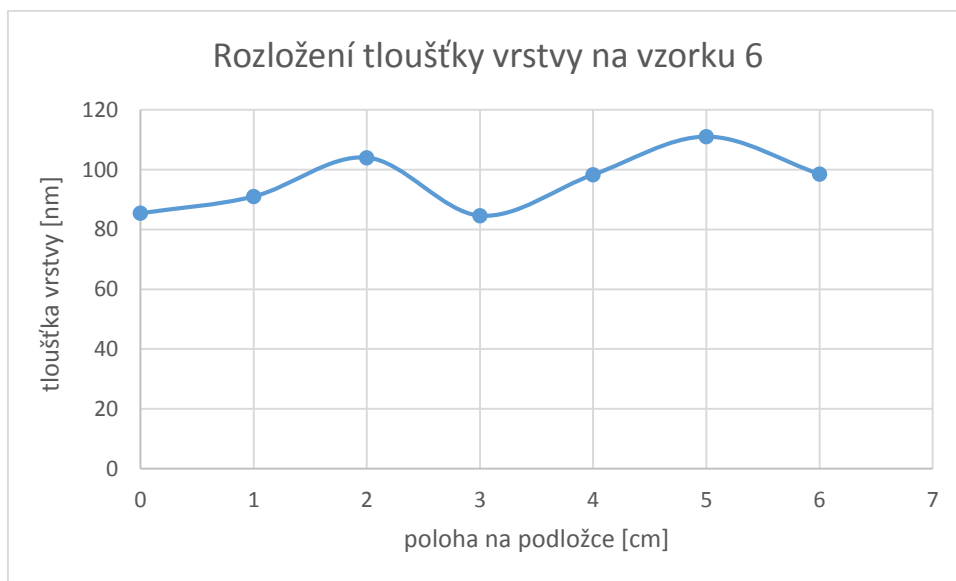


Obr. 27 Foto vzorku 6

Tento vzorek by měl vykazovat v podstatě stejné hodnoty jako vzorek 5 ale jak je vidět, vrstva je o něco tlustší. To může být dáno opět nepřesností v měření, ale spíše to bude tím, že v prvním případě se nemusel vypařit veškerý materiál, ale něco tam mohlo zůstat, co se vypařilo až při výrobě tohoto vzorku, a proto může být silnější.

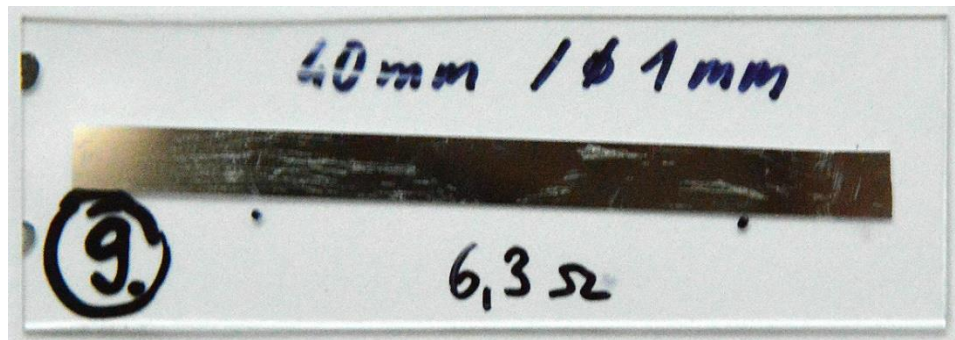
Tab. 12 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 6

poloha na podložce [cm]	0	1	2	3	4	5	6
tloušťka vrstvy [nm]	85,4	91	104	84,6	98,3	111	98,5



Graf 8 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 6

5.2.5 Napařené / délka 40 mm



Obr. 28 Foto vzorku 9

Tento vzorek byl tvořen jen z drátu o délce 40 mm, a tudíž by měla být výsledná vrstva slabší, což se při pokusu neukázalo. Může to být opět způsobeno oběma aspekty, který byli uvedeny výše.

Tab. 13 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 9

poloha na podložce [cm]	0	1	2	3	4	5	6
tloušťka vrstvy [nm]	70,6	114	163	77,7	83	63,3	149



Graf 9 Rozložení tloušťky vrstvy na vzorku 9

6 Závěr

Cílem této práce bylo shrnout poznatky o hybridních integrovaných obvodech, jejich výrobě a hlavně o tenkých vrstvách. To bylo vyřešeno ve třetí a čtvrté kapitole. Poté jsme vyrobili různé vzorky, abychom mohli prakticky ověřit vlastnosti tenkých vrstev a vliv některých podmínek na konečný výsledek.

První rozdílné podmínky byly, že některé vzorky byly vytvořeny napařováním a některé napařováním. Zjistila jsme, že vzorky vytvořené napařováním mají

rozhodně lepší adhezní hodnoty než ty napařené, které byly snadno poškrabány již při kontaktním měření odporu. To je dáno hlavně tím, že při naprašování mají částice, které dopadají na podložku mnohem větší energii. Předpokládali jsme, že v případě napařených vrstev bude rozložení tloušťky vzorku konstantní zatím co u naprašovaných se bude vrstva k okrajům ztenčovat. První domněnka se nepodařila dokázat ale to asi hlavně kvůli tomu, že při proměření profilu vzorku nebyly ideální podmínky pro měření (přestavba vedlejší budovy). V druhém případě se podařilo teorii ověřit a vážně všechny naprašované vrstvy byly na okrajích tenčí.

Druhá podmínka, jejíž vliv na vrstvu jsme sledovali, byla rozdílná podložka pro vrstvu. Použili jsme sklo a korund. V našem případě byl korund jen broušený a proto dost dost hrubý. Ve výsledku to dopadlo tak, že naprašovaný materiál v podstatě vyplnil „díry“ v podložce a ta se stala méně hrubá. Konečná vrstva ale nebyla ani nijak zvlášť znatelná a nešel u ní změřit odpor.

Třetí změnou byl rozdílný výkon při naprašování. V prvním případě to bylo 50 W a v druhém 80 W. Předpokládali jsme, že pokud se zvýší výkon, tak bude vrstva méně homogenní a tlustší. To by se mělo dít proto, že když se zvýší výkon tak se také zvýší rychlost nanášení a tudíž se na vrstvu přenesou více materiálu ale ne tak rovnoměrně. To se při proměření vzorku ukázalo oboje jako pravda. Drsnost vrstvy naprašované při větším výkonu byla dvojnásobná a tloušťka o přibližně polovinu větší.

Poslední podmínkou, která se měnila bylo množství výchozího materiálu při napařování. Teoreticky by měla být vrstva vytvořená z více materiálu tlustší ale to se při našem měření neprokázalo. To bude asi hlavně díky nepřesnosti měření.

Také jsem teoreticky vypočetla odpory jednotlivých vrstev a poté je porovnávala s naměřenými. Jak je vidět teoretický odpor nemá v podstatě žádnou výpovědní hodnotu a to pro to, že vrstva hned po vyjmutí z aparatury mírně zoxiduje a tím se odpor zvýší a také tím, že jsme nezkoumali homogenitu vrstvy, která může také ovlivnit výsledný odpor.

Tab. 14 Srovnání vypočtených a naměřených odporů

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vypočtený odpor [Ω]	2,88	-	2,07	2,08	3,55	2,78	0,95	1,68	2,59	1,47
Naměřený odpor [Ω]	70	-	12	20	-	4,5	3,5	3,6	6,3	3,9

V této práci se tedy povedlo proměřit několik důležitých parametrů tenkých vrstev a posoudit vliv odlišných podmínek, při vytváření tenkých vrstev, na konečný výsledek. Zjištěné hodnoty povětšinou odpovídali teoretickým předpokladům a pokud ne tak, to byla asi vina stížených podmínek při proměření vzorků.

7 Bibliografie

- Adámek, Martin.** Technologie výroby a používané materiály. *Internetové stránky Martin Adámka*. [Online] VUT. [Citace: 29. 12 2014.]
http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_2_3_2.htm.
- ATeam.** 2005. Metody měření a hodnocení adhezivně kohezivního chování systémů tenká vrstva – substrát. *ATeam*. [Online] 2005. [Citace: 27. 4 2015.]
<http://www.ateam.zcu.cz/adheze.html>.
- Eckertová, Ludmila.** 1973. *Fyzika tenkých vrstev*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1973.
- Ekrt, Ondřej.** Technologie a vlastnosti tenkých vrstev, tenkovrstvé senzory. [Online] [Citace: 25. 4 2015.]
http://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/05_TechnologieCVD_+PVD_PECVD_MOV_PE_MBE.pdf.
- Erben, Milan.** 2008. Vakuová technika. *Katedra obecné a anorganické chemie, Fakulta chemicko-technologická, Univerzita Pardubice* . [Online] 2008. [Citace: 19. 4 2015.] <http://www.upce.cz/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf>.
- Koblížek, Vilém.** Vytváření tenkých vrstev ve vakuu. *Laboratorní úlohy k předmětu A1B13VST*. [Online] [Citace: 27. 12 2014.]
http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/A1B13VST-lab_soubory/Uloha_c.6.pdf.
- Mach, Pavel.** 2008. Pouzdra integrovaných obvodů. *A1B13VST Výkonové součástky a technologie*. [Online] 19. 3 2008. [Citace: 30. 1 2015.]
<http://ocw.cvut.cz/moodle/course/view.php?id=289>.
- Pelikánová, Ivana Beshajová.** 2011. Tlusté vrstvy - tisk, vytvrzení, měření. *Elektrotechnické materiály a technologie - výukové materiály*. [Online] 8. 2 2011. [Citace: 30. 12 2014.]
<http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/tlustvrsvy.pdf>.
- Rachůnek, Ing. Antonín.** 2011. Integrované obvody. *Coptel - Elektrotechnika*. [Online] 14. Květen 2011. [Citace: 27. 12 2014.]
<http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=21788&docGroup=145&cmd=0&instance=1>.
- Seshan, K.** 2002. *Handbook of thin-film deposition processes and techniques : principles, methods, equipment and applications*. místo neznámé : Norwich, 2002.
- Szendiuch, Ivan.** 1997. *Mikroelektronické montážní technologie*. Brno : VUTIUM, Nakladatelství Vysokého učebního technického v Brně, 1997. ISBN 80-214-0901-0.
- . Polovodičové čipy. [Online] [Citace: 30. 11 2014.]
http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/03a_polovodicove_cipy.pdf.

— . **2012-2013.** Tlusté vrstvy. *Ústav Mikroelektroniky*. [Online] 2012-2013. [Citace: 25. 12 2014.] [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy(Bc).pdf).

— . Trendy v pouzdření a propojování. [Online] [Citace: 3. 2 2015.] http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/04a_pouzdeni_a_substraty.pdf.

— . **2006.** *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství Vutium, 2006.

Šavel, Josef. 2003. *Materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. Praha : Nakladatelství BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-120-9.

Zusková, Iva. PRAKTIKUM Z FYZIKÁLNÍ CHEMIE. [Online] [Citace: 19. 4 2015.] https://web.natur.cuni.cz/~zuskova/ktp_2_so.pdf.