

Mikroelektronika a technologie součástek Ústav mikroelektroniky FEKT VUT v Brně			Jméno Jakub Charvot	ID 240844
			Ročník 3.	Obor MET Skupina MET/2
Spolupracoval –	Měřeno dne –	Odevzdáno dne 2.5. 2023	Hodnocení	
Název zadání Vlastnosti materiálů tlustých vrstev				Č. úlohy 2

1 Teoretický úvod

Při použití tlustovrstvé technologie je potřeba uvědomit si faktory, které ovlivňují výslednou kvalitu a spolehlivost. Těchto faktorů je mnoho a odvíjí se zejména od použité technologie. Např. při sítotisku musíme vzít v potaz parametry zvolené pasty, substrátu, na který nanášíme, a v neposlední řadě také samotného síta. Optimálního výsledku dosáhneme pouze vhodnou kombinací všech zmíněných faktorů.

Dnešní práce se věnuje vlastnotem používaných past.

1.1 Reologické vlastnosti

Reologie je nauka o tomu a plynutí materiálů. Pro obecný popis tekutosti materiálu můžeme využít tzv. Deborino číslo T :

$$T = \frac{T_{rel}}{T_{obs}}$$

kde T_{rel} je relaxační doba daného materiálu a T_{obs} je doba pozorování.

1.1.1 Viskozita

Viskozita popisuje vnitřní tření kapalin, to ovšem není konstantní, naopak je závislé na několika faktorech, např. na teplotě, složení a koncentraci roztoku a tlaku. Obvykle pracujeme s pojmem **Dynamická viskozita**, jedná se o fyzikální veličinu značenou η , udává odpor, který kladou dvě sousední vrstvy kapaliny vzájemnému pohybu. Jednotkou viskozity je poise (P), ten je definován následovně:

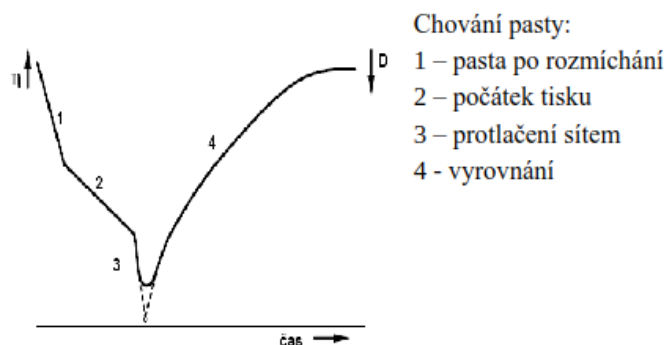
$$1 \text{ P} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$10 \text{ P} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Převrácenou hodnotou viskozity je **fluidita** neboli tekutost.

1.2 Zrnitost

Pasta je obvykle tvořena pevným práškem žádaného materiálu, rozptýleným v pojivu. Při práci s pastou musíme vzít v potaz velikost zrn v prášku. Ta by měla být pokud možno co nejvíce definovaná, stejně tak i tvar zrn. Obvykle se pohybujeme v hodnotách od 1 do 10 μm . Velikost zrn určuje mimo jiné také minimální tloušťku nátěru.



Obr. 1: Časová závislost viskozity při nanášení pasty těrkou, mění se tedy tlak.

Určení velikosti zrn je možné za pomoci **grindometru**[1]. Princip měření spočívá v rozetření pasty přes nakloněnou rovinu při konstantní výšce stěrky. V určitém bodě už zrna nevejdou do prostoru mezi rovinou a stěrku a jsou tedy setřeny pryč. Přístroj obsahuje stupnici, kde je možné následně odečíst požadovanou hodnotu velikosti zrn.

1.3 Adheze

1.3.1 Scratch test

Jednou z metod pro testování adheze tlustých vrstev k substrátu nebo také samotné tvrdosti různých materiálů (zde např. právě použitých substrátů) lze použít vrypovou zkoušku (Scratch test) [2]. Nejvhodnější metodou pro zjištění adheze nanesené vrstvy vůči substrátu je tzv. progresivní test [2], při kterém je postupně zvyšována normálová síla (přítlak hrotu) a současně měřena síla vodorovná v ose pohybu hrotu. V určitý moment dojde k odloupenutí nanesené vrstvy a my můžeme odečíst tzv. kritickou sílu.

2 Praktická část

2.1 Test hodnoty vytvořených rezistorů

Měřili jsme hodnoty elektrického odporu pro různé vzorky tlustovrstvých rezistorů. V prvním kroku jsme měli k dispozici rezistory o aktivní ploše 3 čtverce ve čtyřech různých variantách – bez a nebo s použitím krycí vrstvy; vypálené postupně, tedy po vrstvách, a nebo všechny vrstvy současně. V každé variantě jsme měřili 9 vzorků. Ve druhém kroku jsme pak měřili dvě shodné řady rezistorů s rostoucí aktivní plochou, jedna řada byla opatřena krycí vrstvou. Přehled měřených variant se nachází v Tab. 1. K měření byl použit digitální RLC metr (TODO).

Tabulka 1: Přehled jednotlivých měření odporu.

Č. varianty	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Plocha [sq]	3	3	3	3	různá	různá
Krycí vrstva	NE	ANO	NE	ANO	NE	ANO
Typ výpalu	najednou	najednou	postupně	postupně	najednou	najednou

Z naměřených hodnot jsme vždy stanovili hodnotu odporu na čtverec. Následně jsme vypočetli průměrnou hodnotu \bar{x} , výběrovou směrodatnou odchylku s_x a variační koeficient VK . Jelikož byla k tisku použita odporová pasta s hodnotou vrstvého odporu $100\ \Omega/\text{sq}$ [zdrojem je studentův odhad, protože konkrétní typ použité pasty nám nebyl odhalen], můžeme naměřené hodnoty porovnat také s touto hodnotou, stanovili jsme tedy i relativní odchylku průměrné hodnoty od této teoretické Δ_r . Naměřené hodnoty a zmíněné statistické údaje pro jednotlivá měření se nacházejí v Tab. 2 – 7.

Tabulka 2: Série měření R1 – Naměřené a zpracované hodnoty.

	R [Ω]	R_{sq} [Ω/sq]
	333,82	111,27
	329,55	109,85
	346,68	115,56
	334,16	111,39
	343,70	114,57
	339,74	113,25
	346,30	115,43
	325,41	108,47
	312,67	104,22
x_{teor} [Ω]	300	100
\bar{x} [Ω]	334,67	111,56
Δ_r [%]	11,56%	11,56%
s_x [Ω , Ω/sq]	10,45	3,48
VK [%]	3,12%	3,12%

Tabulka 3: Série měření R2 – Naměřené a zpracované hodnoty.

	R [Ω]	R_{sq} [Ω/sq]
	1217,6	405,87
	1276,3	425,43
	1321,6	440,53
	1265,7	421,90
	1328,6	442,87
	1389,5	463,17
	1451,6	483,87
	1306,2	435,40
	1061,1	353,70
x_{teor} [Ω]	300	100
\bar{x} [Ω]	1290,91	430,30
Δ_r [%]	330,30%	330,30%
s_x [Ω , Ω/sq]	103,91	34,64
VK [%]	8,05%	8,05%

Tabulka 4: Série měření R3 – Naměřené a zpracované hodnoty.

	R [Ω]	R_{sq} [Ω/sq]
	355,03	118,34
	348,78	116,26
	361,69	120,56
	346,98	115,66
	346,19	115,40
	363,28	121,09
	361,12	120,37
	349,22	116,41
	335,97	111,99
x_{teor} [Ω]	300	100
\bar{x} [Ω]	352,03	117,34
Δ_r [%]	17,34%	17,34%
s_x [Ω , Ω/sq]	8,48	2,83
VK [%]	2,41%	2,41%

Tabulka 5: Série měření R4 – Naměřené a zpracované hodnoty.

	R [Ω]	R_{sq} [Ω/sq]
	363,15	121,05
	350,85	116,95
	388,36	129,45
	364,01	121,34
	375,37	125,12
	375,08	125,03
	368,63	122,88
	382,58	127,53
	380,45	126,82
x_{teor} [Ω]	300	100
\bar{x} [Ω]	372,05	124,02
Δ_r [%]	24,02%	24,02%
s_x [Ω , Ω/sq]	10,92	3,64
VK [%]	2,93%	2,93%

Tabulka 6: Série měření R5 – Naměřené a zpracované hodnoty.

Akt. plocha [sq]	R [Ω]	R_{sq} [Ω/sq]
1	68,56	68,56
2	189,09	94,55
3	307,82	102,61
4	429,70	107,43
5	558,80	111,76
6	683,00	113,83
7	805,40	115,06
8	922,00	115,25
9	1006,90	111,88
x_{teor} [Ω]	–	100
\bar{x} [Ω]	–	104,55
Δ_r [%]	–	4,55%
s_x [Ω , Ω/sq]	–	14,24
VK [%]	–	13,62%

Tabulka 7: Série měření R6 – Naměřené a zpracované hodnoty.

Akt. plocha [sq]	R [Ω]	R_{sq} [Ω /sq]
1	102,83	102,83
2	497,50	248,75
3	944,80	314,93
4	1428,10	357,03
5	1936,60	387,32
6	2443,30	407,22
7	3089,40	441,34
8	3551,40	443,93
9	4095,00	455,00
x_{teor} [Ω]	–	100
\bar{x} [Ω]	–	350,93
Δ_r [%]	–	250,93%
s_x [Ω , Ω /sq]	–	108,26
VK [%]	–	30,85%

2.2 Test hodnoty kapacity vytvořených kondenzátorů

V této části jsme měřili hodnoty kapacit kondenzátorů vytvořených za pomoci tlustovrstvé technologie, konkrétně s použitím dielektrické pasty ESL 4917. Vyjdeme ze známého vztahu:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}$$

Katalogový list použité pasty [3] uvádí pro permitivitu a typickou tloušťku vrstvy vždy rozsah hodnot, viz Tab. 8. Pro teoretický výpočet kapacity použijeme tedy vždy okrajové hodnoty:

$$C_{teorMAX} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rMAX} \cdot \frac{S}{d_{MIN}}$$

$$C_{teorMIN} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rMIN} \cdot \frac{S}{d_{MAX}}$$

Tabulka 8: Výňatek z katalogového listu pasty ESL 4917.

d_{MIN}	35 μm
d_{MAX}	50 μm
ε_{MIN}	8
ε_{MAX}	11

Dále jsme pro každý kondenzátor vypočetli kapacitu na čtverec. Stejný postup byl opakován ve dvou variantách, nejprve pro kondenzátory s vrstvami vypálenými současně (viz Tab. 9), poté pro kondenzátory s vrstvami vypalovanými postupně (viz Tab. 10).

Tabulka 9: Teoretické a měřené hodnoty pro kondenzátory s výpalem najednou.

S [sq]	C_{meas} [pF]	C_{sq} [pF/sq]	$C_{teorMIN}$ [pF]	$C_{teorMAX}$ [pF]
4	11,7	2,93	5,667	11,13
25	53,4	2,14	35,42	69,57
50	104,9	2,10	70,83	139,14
100	203,0	2,03	141,67	278,27
200	406,7	2,03	283,33	556,55

Tabulka 10: Teoretické a měřené hodnoty pro kondenzátory s výpalem postupně.

S [sq]	C_{meas} [pF]	C_{sq} [pF/sq]	$C_{teorMIN}$ [pF]	$C_{teorMAX}$ [pF]
4	14,3	3,58	5,67	11,13
25	67,5	2,70	35,42	69,57
50	133,1	2,66	70,83	139,14
100	—	—	141,67	278,27
200	499,3	2,50	283,33	556,55

2.3 Určení velikosti částic v pastě

V této části úlohy nám byly předloženy tři vzorky neznámých past a za pomoci grindometru jsme prakticky stanovili velikost zrn v jednotlivých pastách. Výsledky našeho pozorování se nachází v Tab. 11.

Tabulka 11: Velikost zrn zjištěná za pomoci grindometru.

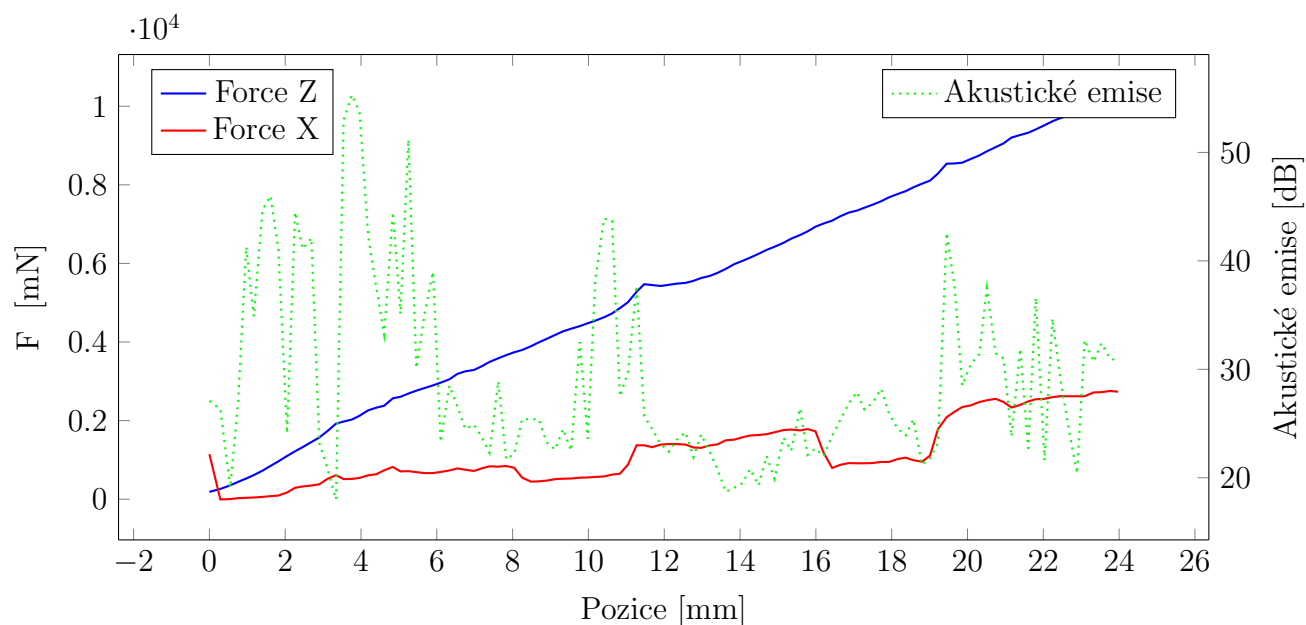
Č. pasty	Typ pasty	Velikost zrn [μm]
1	neznámý	10
2	neznámý	8
4	neznámý	44

2.4 Test vazby vrstvy na substrát

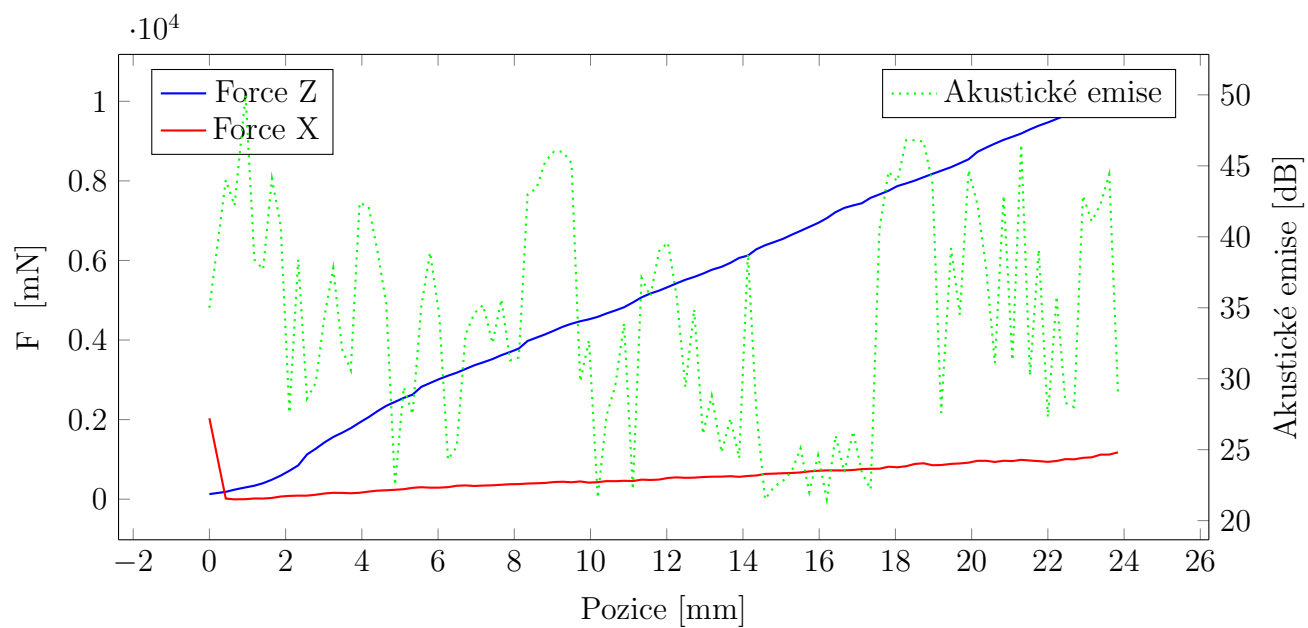
Za pomoci přístroje Scratch Tester jsme testovali vazbu různých tlustovrstvých past na substrát (Alumina). Přístroj nabízí možnost progresivního testu, při kterém je postupně zvyšována normálová síla (F_Z). Ve výsledných datech z přístroje jsou k dispozici hodnoty této síly, síly v ose pohybu (F_X) a hodnotu akustické emise smímané mikrofonem, z té by mělo být zjistitelné, jestli došlo k delaminaci vrstvy [2]. Všechny tyto hodnoty přístroj dává vždy přiřazené ke konkrétní poloze hrotu.

Testovali jsme tři typy past, získané hodnoty jsou zobrazeny na Obr. 2 (Cermetová pasta), Obr. 3 (Polymerová pasta) a Obr. 4 (Rezinátová pasta).

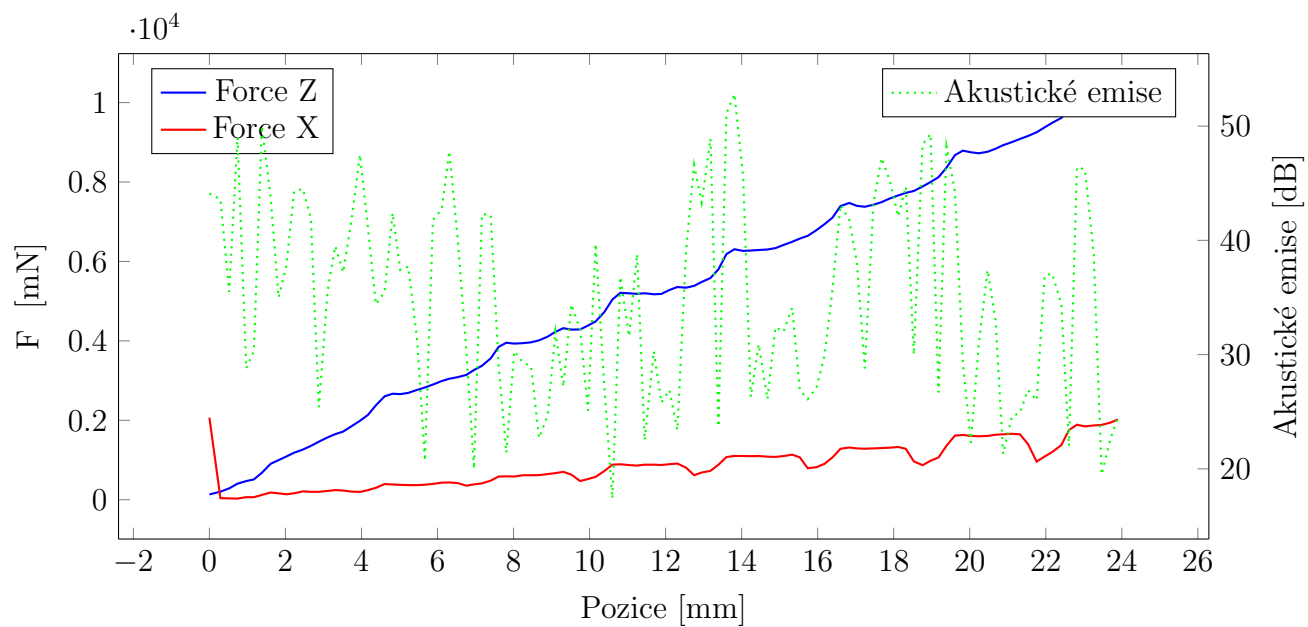
Následně jsme vytvořenou rýhu analyzovali mikroskopem (TODO).



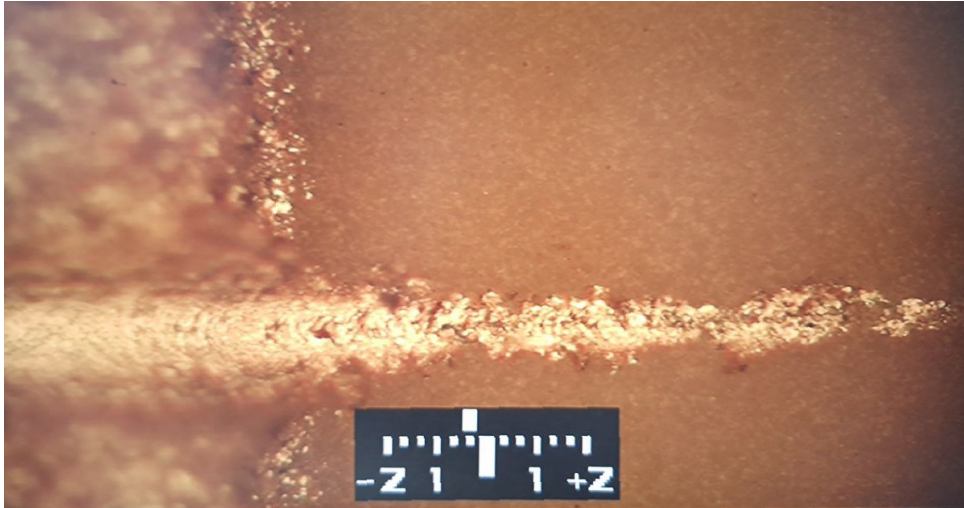
Obr. 2: Scratch test – Cermet.



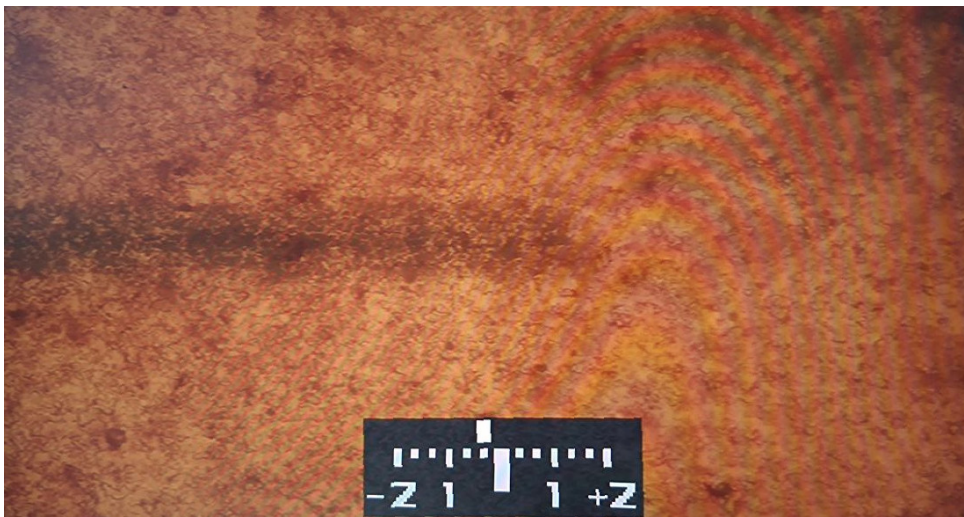
Obr. 3: Scratch test – Polymer.



Obr. 4: Scratch test – Rezinát.



Obr. 5: Cermetová pasta po scratch testu (TODO).



Obr. 6: Rezinátová pasta po scratch testu (TODO).



Obr. 7: Polymerová pasta po scratch testu (TODO).

3 Závěr

Ahoj.

Reference

- [1] OTÁHAL, A.; SKÁCEL, J. *Vlastnosti materiálů tlustých vrstev* [online]. 2023. [cit. 2023-10-11]. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/783346/mod_resource/content/1/LC_Vlastnosti%20TVL_02_2023.pdf.
- [2] BRANDEJS, Petr. *Návrh přístroje na zkoušky vrypem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2022.
- [3] ESL ELECTRIC SCIENCE. *Dielectric composition 4917* [online]. [cit. 2023-10-16]. Dostupné z: <http://www.lichuangxin.cn/pdf/all.pdf>.