

| | | | |
|--|---------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 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 23.10. 2023 | Odevzdáno dne 19.10. 2023 | Hodnocení |
| Název zadání Měření vlastností tlustovrstvých rezistorů | | | Č. úlohy 3 |

1 Teoretický úvod

1.1 Čtyřbodová metoda

Jedná se o relativně přesnou metodu měření vrstvového odporu. Je možné ji použít jak při kontrole kvality polovodičů, tak i při testování TLV odporů [1]. Metoda je použitelná pouze pro vzorky s podstatně většími rozměry, než je vzdálenost měřících hrotů [2].

Jako měřící prostředek slouží čtveřice hrotů umístěných nejlépe v jedné linii. Mezi krajiními hroty necháme protékat definovaný proud a mezi prostředními hroty pak měříme úbytek napětí, který tento proud vyvolá.

Pokud neměříme vzorky s nekonečnou plochou, je potřeba měření kompenzovat různými korekčními faktory. Zejména kompenzujeme geometrické rozdíly a tvar vzorku, k tomu je možné využít např. van der Pauwovu metodu [1, 2]. Pro časté tvary a rozdíly vzorků pak můžeme vytvořit tabulku kompenzačních koeficientů, stejně tomu bylo zřejmě i při přípravě této úlohy.

1.2 Teplotní koeficient odporu (TKR)

Tento koeficient popisuje změnu odporu (potažmo rezistivity) materiálu v závislosti na změně teploty. Rozlišujeme pozitivní a negativní, při pozitivním TKR hodnota odporu s teplotou roste a naopak.

Výpočet odporu s uvážením TKR je následující:

$$R = R_0[1 + TKR \cdot (T - T_0)]$$

Po vyjádření TKR získáme:

$$TKR = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot (T - T_0)}$$

Zobecněním tohoto vyjádření získáme:

$$TKR = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}$$

Tuto změnu rezistivity způsobují různé fyzikální faktory. S rostoucí teplotou se zvyšuje amplituda tepelných kmitů čistic, s čímž souvisí zhoršení průchodnosti pro elektrony a zvýšení odporu. Tento jev obvykle převládá u kovů a mají tedy obvykle pozitivní TKR. Naopak u polovodičů dochází s rostoucí teplotou ke zvýšené generaci nosičů náboje a tedy

odpor naopak klesá, TKR je negativní [1]. Složení materiálu je tedy zásadním parametrem. U TLV rezistorů můžeme TKR ovlivnit také dalšími parametry pasty, vliv má např. velikost zrn nebo vnitřní tření [3].

2 Praktická část

2.1 Měření odporů čtyřbodovou metodou

Čtyřbodovou metodou jsme měřili substrát č. 4. K napájení soustavy byl použit laboratorní zdroj (MATRIX MPS-3005L-3) a nastavovali jsme proud 1 mA, který jsme měřili a kontrolovali za pomoci digitálního multimetru (KEYSIGHT 34465A). Pro některá měření rozsah zdroje nestačil pro vytvoření tohoto proudu, měřili jsme tedy s proudem menším. Po nastavení proudu jsme měřili napětí druhým digitálním multimetrem (UNI-T UT804).

Plošky 1A a 1B jsou ohraničené (s kontaktními ploškami), zbytek je pak neohraničený. Tomuto faktu je potřeba přizúšobit výpočet vrstvového odporu.

Pro ohraničené vzorky vyjdeme ze vztahu:

$$R_V = \frac{U_{23}}{I_{14}K_1} [\Omega/\text{sq}]$$

Pro neohraničené pak:

$$R_V = \frac{U_{23}}{I_{14}} C [\Omega/\text{sq}]$$

Změřené a vypočtené hodnoty se nachází v Tab. 1.

Tabulka 1: Měřené a vypočtené hodnoty pro čtyřbodové měření.

| Č. plošky | K_1 | C | I_{14} [mA] | U_{23} [V] | R_V [Ω/sq] |
|-----------|-------|-------|---------------|--------------|------------------------------|
| 1A | 0,44 | 2,270 | 1 | 6,447 | 14 652,27 |
| 1B | 0,44 | 2,270 | 1 | 6,430 | 14 613,64 |
| 2A | 0,285 | 3,500 | 0,962 | 4,778 | 17 383,58 |
| 2B | 1/3 | 3,000 | 0,818 | 5,661 | 20 761,61 |
| 2C | 0,7 | 1,425 | 0,532 | 7,459 | 19 979,46 |
| 2D | - | - | 0,200 | 7,6825 | - |

2.2 Měření teplotního koeficientu odporů – TKR

Měřili jsme teplotní závislost odporu dvou tlustovrstvých rezistorů v teplotním rozsahu 25 až 140 °C. Odpor byl měřen dvojicí digitálních multimetrů (UNI-T UT805A) a teplota termočlánkem typu K. Naměřené hodnoty odporu širokého (R_S) a dlouhého (R_D) rezistoru se nachází v Tab. 2, zobrazeny jsou pak v grafu na Obr. 1, kde jsou také proloženy regresními přímkami. Rovnice vypočtených přímek jsou následující:

$$R_S = 2,13097 - 0,0000512435 \cdot t$$

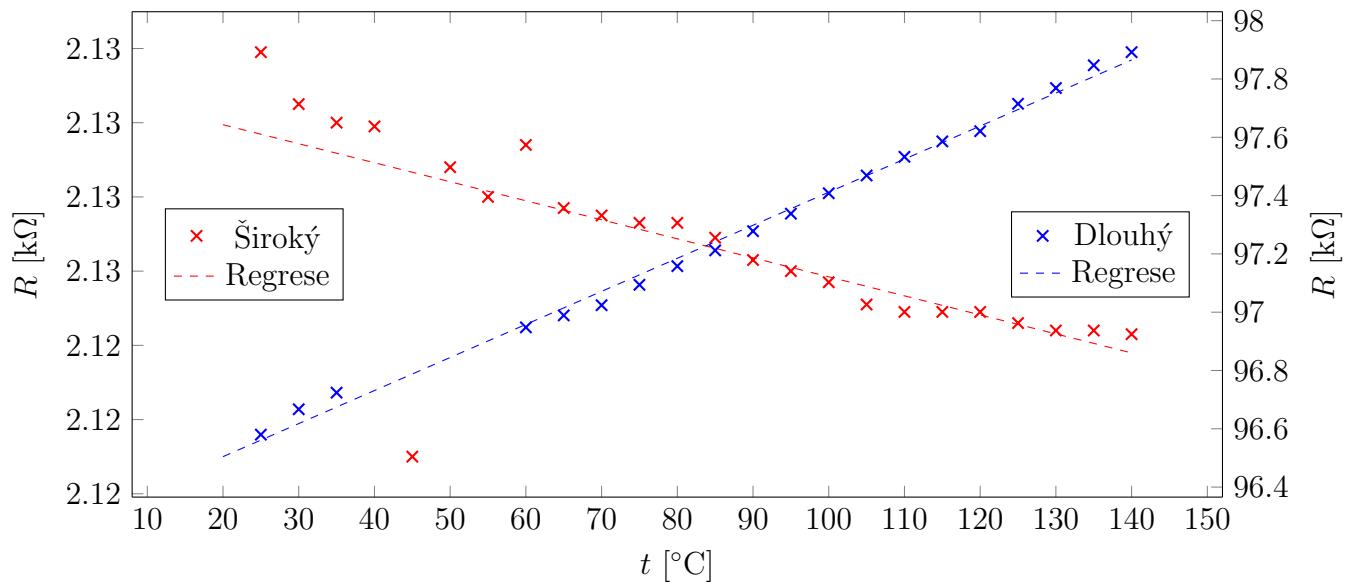
$$R_D = 0,0113403 \cdot t + 96,2776$$

TKR pak můžeme z těchto rovnic vyčítat následovně:

$$TKR_S = \frac{-0,0000512435}{2,13097} \cdot 100 \doteq -2,404 \cdot 10^{-3} \% \cdot {}^\circ\text{C}^{-1}$$

$$TKR_D = \frac{0,0113403}{96,2776} \cdot 100 \doteq 1,178 \cdot 10^{-2} \% \cdot {}^\circ\text{C}^{-1}$$

Pro široký rezistor nám vyšel TKR negativní a naopak pro dlouhý rezistor vyšel TKR pozitivní.



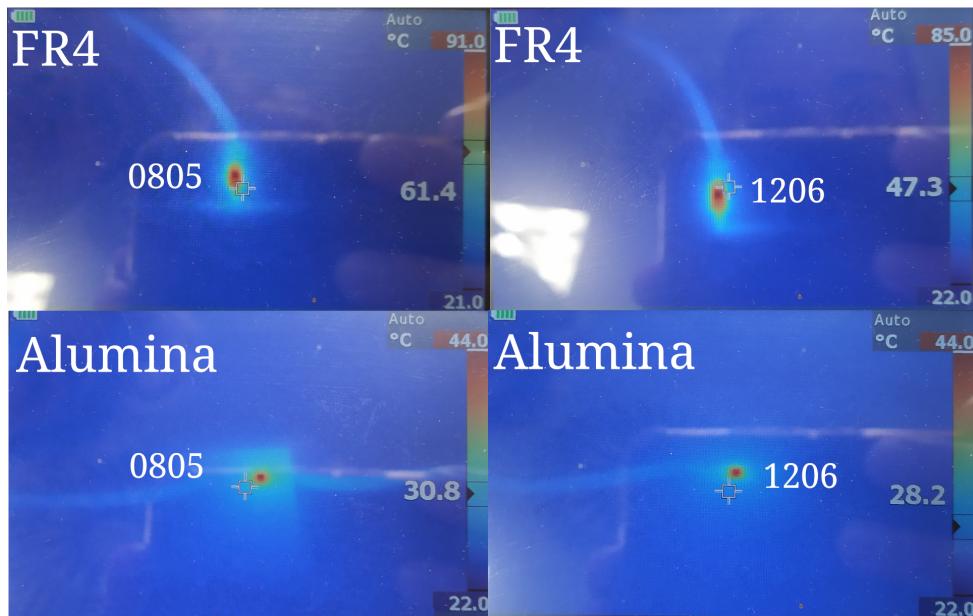
Obr. 1: Teplotní závislost dvou TLV rezistorů.

Tabulka 2: Naměřené hodnoty odporů pro rostoucí teploty.

| t [°C] | R_S [kΩ] | R_D [kΩ] |
|----------|------------|------------|
| 25 | 2,1319 | 96,580 |
| 30 | 2,1305 | 96,667 |
| 35 | 2,1300 | 96,724 |
| 40 | 2,1299 | - |
| 45 | 2,1210 | - |
| 50 | 2,1288 | - |
| 55 | 2,1280 | - |
| 60 | 2,1294 | 96,948 |
| 65 | 2,1277 | 96,989 |
| 70 | 2,1275 | 97,024 |
| 75 | 2,1273 | 97,094 |
| 80 | 2,1273 | 97,158 |
| 85 | 2,1269 | 97,212 |
| 90 | 2,1263 | 97,278 |
| 95 | 2,1260 | 97,338 |
| 100 | 2,1257 | 97,408 |
| 105 | 2,1251 | 97,469 |
| 110 | 2,1249 | 97,533 |
| 115 | 2,1249 | 97,586 |
| 120 | 2,1249 | 97,621 |
| 125 | 2,1246 | 97,715 |
| 130 | 2,1244 | 97,769 |
| 135 | 2,1244 | 97,847 |
| 140 | 2,1243 | 97,892 |

2.3 Výkonové zatížení odporu

Postupně jsme testovali čtyři vzorky rezistorů a to konkrétně jejich výkonovou zatížitelnost v závislosti na použitém substrátu. Na laboratorním zdroji (TTi QPX1200SP) jsme nastavili napětí 7 V a přibližně odečetli také odebíraný proud, pro všechny vzorky to bylo 0,06 A. Vzorky pokryté termoemisní barvou jsme následně pozorovali termokamerou (FLUKE) a po ustálení stavu, tedy při maximální dosažené teplotě, jsme hodnoty zaznamenali. Porovnání jednotlivých měření se nachází na Obr. 2.

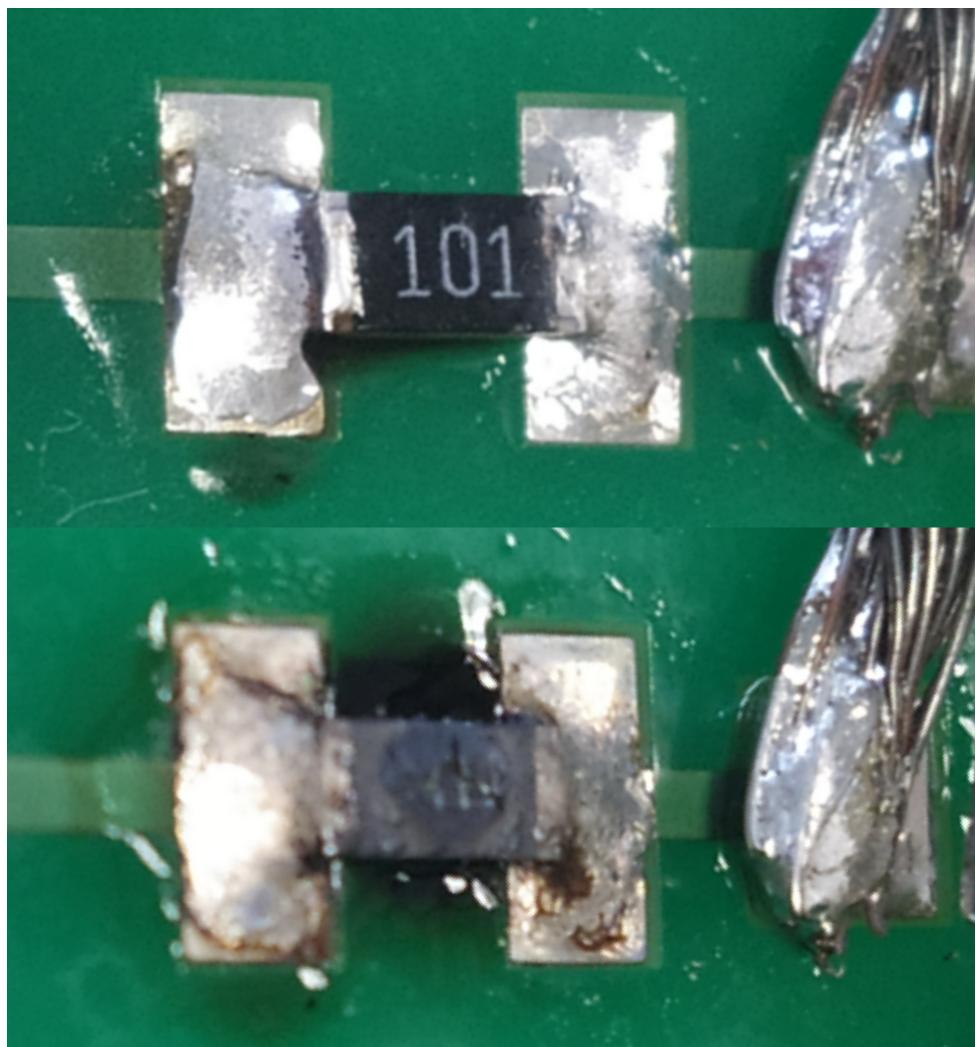


Obr. 2: Porovnání ohřevu SMD rezistorů pouzder 0805 a 1206 na různých substrátech.

Ve druhé části byl proveden destruktivní test SMD rezistoru. Zvyšováním napětí na laboratorním zdroji dochází k nárustu procházejícího proudu, ohřevu rezistoru a následně tepelnému poškození a zničení celé součástky. Výsledek testu je zobrazen na Obr. 3. Průběh zkoušky popisuje Tab. 3.

Tabulka 3: Průběh destruktivního testu SMD rezistoru.

| U [V] | Popis situace |
|-------|-----------------------|
| 12,5 | rezistor syčí |
| 14,3 | odpařování tavidla |
| 22,2 | nečitelný popisek |
| 24,7 | zvýšený zápach |
| 25,6 | viditelné žhavé místo |
| 26,9 | spálení součástky |



Obr. 3: Destrukční test SMD rezistoru.

3 Závěr

Na dodaném substrátu (č. 4) jsme za pomoci Čtyřbodové metody měřili vrstvový odpor různých TLV vzorků. S použitím korekčních koeficientů jsme získali hodnoty v rozsahu přibližně $14 - 21 \text{ k}\Omega/\text{sq}$. Jestli je rozptyl způsoben skutečně různými hodnotami a nebo nedostatečnou korekcí by bylo nutné ověřit měřením jinou metodou popř. více vzorků. Vzorek 2D nebylo možné stanovit, protože zde již neplatí podmínka geometrických rozměrů – pro použití této metody by mely rozměry vzorků být výrazně větší než rozestup měřících hrotů.

Dále jsme u dvou dodaných TLV rezistorů měřili TKR, pro široký (a krátký) rezistor jsme došli k $TKR_S \doteq -2,404 \cdot 10^{-3} \% \cdot {}^\circ\text{C}^{-1}$, jedná se tedy o negativní TKR. Pro dlouhý (a úzký) rezistor jsme naopak stanovili $TKR_D \doteq 1,178 \cdot 10^{-2} \% \cdot {}^\circ\text{C}^{-1}$. Protože mě nenapadá žádné odvědonění toho, proč by měl tvar rezistoru ovlivnit jeho TKR, nabízí se jednoduché vysvětlení – každý z rezistorů byl zřejmě vytvořen jinou pastou.

Při testování výkonové zatížitelnosti rezistorů jsme ověřili náš původní předpoklad a také informace získané simulací na počítačových cvičeních. Čím větší je pouzdro součástky, tím lépe odvádí přebytečné teplo, v případě substrátu FR4 dosáhla menší součástka teploty $91 {}^\circ\text{C}$, což je o $6 {}^\circ\text{C}$ více, než součástka větší. Na keramickém substrátu je teplo obecně odváděno mnohem účinněji a maximální dosažené teploty pro obě součástky byly pouze $44 {}^\circ\text{C}$. Pro menší součástku dochází ale k většímu ohřevu substrátu, takže při vyšší zástavbové hustotě by i zde hrála velikost pouzdra roli.

Nakonec jsme destruktivním testem pozorovali změnu SMD rezistoru při přiložení nadměrného napětí. Náš vzorek vydržel (i když už s nevratným poškozením) až do napětí $26,9 \text{ V}$. Bylo by zajímavé vyhledat v datasheetu, pro jaký rozsah zatížení byl rezistor určen, a porovnat je se zjištěnými.

Reference

- [1] OTÁHAL, A. *Měření vlastností tlustovrstvých rezistorů* [online]. 2022. [cit. 2023-10-22]. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/788241/mod_resource/content/1/Uloha%20%C4%8D.3_2022.pdf.
- [2] HRABOVSKÝ, M. *Výroba nanostruktur na grafitových/grafenových vrstvách a měření jejich transportních vlastností za pokojové teploty* [Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství]. 2012. Vedoucí Ing. Miroslav Bartošík, Ph.D.
- [3] RAO, Y. S. Studies on temperature coefficient of resistance (TCR) of polymer thick film resistors. *Microelectronics International*. 2008, roč. 25, č. 3, s. 33–36. ISBN 13565362. Dostupné také z: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/studies-on-temperature-coefficient-resistance-tcr/docview/216324004/se-2>.