



UDK:531.781.2

Gulmurza ABDURAXMONOV,
O'zMU Fizika fakulteti professori
E-mail: gulmirzo@mail.ru,
Muhridin TURSUNOV,
O'zMU Fizika fakulteti tayanch doktoranti
Avazbek DEXQONOV,
O'zMU Fizika fakulteti tayanch doktoranti

Fizika-matematika fanlari doktori, professor B.Umirzakov taqrizi asosida

POSSIBILITIES OF MAKING A STRAIN GAUGE FROM SILICATE GLASS DOPED WITH RUTHENIUM DIOXIDE

Annotation

In this paper, the effects of resistor paste components and baking temperature on the temperature coefficient of resistance (TCR) of a thick-film resistor were systematically investigated. Thick film resistors prepared from RuO₂ concentrations (from 10 wt% to 30 wt%) baked at different temperatures on an Al₂O₃ substrate were investigated. The relationship between resistor resistance, TCR and scale factor (GF) was studied. The results show that TCR also increases with increasing RuO₂ concentration and baking temperature. Near the minimum (T_{min}) of the resistance-temperature curve, the temperature has the least effect on the resistance value, and a thick-film resistor can be considered insensitive to temperature in a certain range. The ratio of TCR to GF and T_{min} depends on the film resistance of thick film resistors. By varying the concentration of the conductive phase and the baking temperature, the film resistance of thick-film resistors can be controlled, and low-temperature strain gauges can be achieved for different ambient temperatures.

Key words: Thick film resistor, temperature coefficient of resistance (TCR); gauge factor (GF), doped silicate glass, RuO₂ metal oxide.

ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕНЗОДАТЧИКА ИЗ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА, ЛЕГИРОВАННОГО ДИОКСИДОМ РУТЕНИЯ

Аннотация

В этой статье было систематически исследовано влияние компонентов резисторной пасты и температуры обжига на температурный коэффициент сопротивления (TCR) толсто пленочного резистора. Исследованы толсто пленочные резисторы, изготовленные из концентраций RuO₂ (от 10% до 30% по массе), прокаленных при различных температурах на подложке из Al₂O₃. Исследована взаимосвязь между сопротивлением резистора, TCR и масштабным коэффициентом (GF). Результаты показывают, что TCR также увеличивается с увеличением концентрации RuO₂ и температуры обжига. Вблизи минимума (T_{min}) кривой сопротивление-температура температура оказывает наименьшее влияние на значение сопротивления, и толсто пленочный резистор можно считать нечувствительным к температуре в определенном диапазоне. Отношение TCR к GF и T_{min} зависит от сопротивления слоя толсто пленочных резисторов. Изменяя концентрацию проводящей фазы и температуру обжига, можно контролировать пленочное сопротивление толсто пленочных резисторов и получать низкотемпературные тензорезисторы для различных температур окружающей среды.

Ключевые слова: толсто пленочный резистор, температурный коэффициент сопротивления (TCR); калибровочный коэффициент (GF), легированное силикатное стекло, оксид металла RuO₂.

RUTENIY DIOKSIDI BILAN LEGIRLANGAN SILIKAT SHISHADAN TENZODATCHIK YASASH IMKONIYATLARI

Annotatsiya

Ushbu maqolada rezistorli pasta komponentlari va pishirish haroratining qalin qatlamli rezistorning qarshilik harorat koeffitsientiga (TCR) ta'siri tizimli ravishda o'rganildi. Al₂O₃ tagligida turli xil temperaturalarda pishirilgan RuO₂ konsentratsiyasidan (10 wt% dan 30wt% gacha) tayyorlangan qalin qatlamli rezistorlar tekshirildi. Rezistorlar qarshiligi, TCR va o'lovch omili (GF) o'rtasidagi munosabatlar o'rganildi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, RuO₂ konsentratsiyasi va pishirish harorati ortishi bilan TCR ham ortadi. Qarshilik-harorat egri chizig'ining minimal (T_{min}) yaqinida harorat qarshilik qiymatiga eng kam ta'sir qiladi va qalin qatlamli rezistor ma'lum bir diapazonda haroratga sezgir emas deb hisoblash mumkin. TCR ning GF va T_{min}ga nisbati qalin qatlamli rezistorlarning qatlam qarshiligiga bog'liq. Supero'tkazuvchilar fazaning konsentratsiyasini va pishirish haroratini o'zgartirish orqali qalin qatlamli rezistorlarning qatlam qarshiligini nazorat qilish mumkin, so'ngra turli xil muhit haroratlari uchun past haroratlarni sezmaydigan tenzodatchiklarga erishish mumkin.

Kalit so'zlar: Qalin qatlamli rezistor, qarshilikning harorat koeffitsienti (TCR); o'lovch omili (GF), legirlangan silikat shisha, RuO₂ metal oksidi.

Kirish. So'nggi yillarda barqarorligi, deformatsiya sezuvchanligi va bir qator afzalliklari tufayli qurilish muhandisligi sohasiga qalin qatlamli rezistorlar deformatsiya datchiklari sifatida kirib kelmoqda [1,2]. Ideal tenzodatchik katta o'lovch omiliga ega bo'lishi va boshqa omillar datchikga ta'sir qilmasligi kerak. Biroq, aslida datchikga xalaqit beradigan boshqa omillar mavjud, masalan, elektromagnit maydonlar, harorat, namlik va boshqalar. Elektromagnit maydonlar va namlik muammosini tashqi muhitdan himoya qilish orqali hal qilish mumkin [3]. Tenzodatchiklarning sezgirligini oshirish uchun umumiy usullar, haroratni qoplash texnologiyalaridan foydalanish [4] va haroratga sezgir bo'lmagan datchiklar rezistorlarini yaratish kerak [5]. Haroratni qoplash o'rni, haroratning sensorlarga ta'sirini kamaytirishning yana bir usuli – haroratga nisbatan kamroq sezgir bo'lgan materiallardan foydalanish. Shu nuqtai nazardan, tolali Bragg panjara datchiklari bo'yicha ko'plab tadqiqotlar mavjud. Oldingi tadqiqotlar, asosan, panjara tuzilishini o'zgartirdi yoki juda past kengayish koeffitsientiga ega bo'lgan tagliklardan foydalangan holda haroratga sezgir bo'lmagan panjara oldi [6,7]. Haroratni qoplash texnologiyalari bilan taqqoslaganda, haroratga sezgir bo'lmagan datchiklar datchiklarning murakkabligini yoki olish texnologiyasini soddalashtirishi va datchikning sezgirligini oshirishi mumkin. Qalin qatlamli rezistorlarning haroratga sezgir bo'lishi, rezistor qatlamining qalinligiga [8], rezistor pastalari tarkibiga [9], yoqish sharoitlariga [10,11], va taglik materiallariga qarab o'zgarishi mumkin[12].

Ushbu maqolada biz pasta tarkibiy qismlarini va haroratga nisbatan sezgir bo'lmagan qalin qatlamli rezistorlarni olish uchun pishirish sharoitlarini o'zgartirish orqali TCRni boshqarishimiz mumkin. Bunday qalin qatlamli rezistorlar to'g'ridan-to'g'ri ma'lum bir harorat oralig'ida qo'shimcha komponentlar va sxemalarsiz qo'llanilishi mumkin. Qalin qatlamli rezistorning qarshilik-temperatura egri chizig'i TCR ning qiymati 0 ga yaqin bo'lsa deyarli parabolik ko'rinishda bo'ladi [13]. Qarshilik-harorat egri chizig'ining eng past nuqtasida (T_{min} haroratda) qalin qatlamli rezistor haroratga sezgir emas deb hisoblanadi.

Ushbu ish qalin qatlamli rezistorlarning qarshilik-temperatura xususiyatlarini tizimli o'rganishni talab qiladi. Haroratning qalin qatlamli rezistorning qarshilik qiymatiga ta'siri ikki jihatni o'z ichiga oladi: harorat o'zgarishi natijasida yuzaga keladigan qalin qatlamli rezistor qarshiligining o'zgarishi; qarshilik qatlami va taglik o'rtasidagi issiqlik kengayish koeffitsienti farqi natijasida yuzaga kelgan termal deformatsiya. Qarshilikning o'zgarishi asosiy o'tkazuvchanlik mexanizmlarini o'z ichiga oladi, jumladan, tunnel modeli [13], sakrab o'tish nazariyasi [14], tor o'tkazuvchanlik diapazonlari va omik kontaktlar [15]. Biroq, aniq bir nazariya aniqlanmagan, ammo 96% li Al_2O_3 taglikga RuO_2 asosida tayyorlangan qalin qatlamli rezistorlarning haroratga bog'liqligi sakrab o'tish nazariyasiga mos kelishi haqida keng tarqalgan eksperimental dalillar mavjud [16]. Qarshilik va harorat o'rtasidagi munosabat quyidagi tenglama bilan ifodalanishi mumkin:

$$R = R_0 \sqrt{T \exp(T_0/T)^{1/4}} \quad (1)$$

bu yerda T_0 quyidagicha aniqlanadi:

$$T_0 = \frac{16\alpha^3}{kN_0} \quad (2)$$

Bu erda k - Bolsman doimiysi, N_0 - o'tkazuvchan zarrachalarning hajm va energiya birligidagi zichligi, α - zarracha hajmi va shisha xususiyatlariga bog'liq parametr. Qarshilik-harorat qiymatlari (1) ifoda bilan hisoblash orqali qarshilik harorati egri chizig'ining eng past nuqtasidagi haroratni aniqlash mumkin, bu datchiklarning haroratga sezgir bo'lmagan diapazonini olishga yordam beradi.

Material va metodlar. Ushbu tadqiqot O'zbekiston Milliy universiteti Fizika fakulteti Nanokompazitsion materiallar ilmiy laboratoriyasida professor o'qituvchi, tayanch doktorantlar va ilmiy xodimlar tomonidan amalga oshirildi. Tadqiqot obekti sifatida konsentratsiyasi 10-30% RuO_2 metal oksidi va qo'rg'oshin borosilikat shisha kukunlari aralashmasidan tayyorlangan rezistor olindi. Bunda RuO_2 metal oksidiga qo'rg'oshin borosilikat shisha kukunlari aralashtirilib vaqtinchalik shakl hosil qiluvchi va namuna pishirish jarayonida uchib chiqib ketadigan aralashma aralashtirilib gel ko'rinishidagi pasta hosil qilindi. Hosil bo'lgan pasta trafaret yordamida keramik taglikka o'tqazildi. Tayyor bo'lgan rezistorli pastalar pechda quritilib 10 daqiqa davomida turli haroratlarda ($750^\circ C$, $850^\circ C$ va $950^\circ C$) pishirildi. Natijada hosil bo'lgan qalin qatlamli rezistor normalashtirilgan qarshilik koeffitsiyentining haroratga bog'liqligi, TCR ning RuO_2 konsentratsiyasiga bog'liqligi o'rganildi va eksperimental natijalarni sakrab o'tish-perkolatsiya modeliga moslashtirildi.

Tajriba.

Namuna tayyorlash. Ushbu maqolada laboratoriyada ishlab chiqarilgan RuO_2 rezistorli pastasi ishlatildi. Pastalarning asosiy tarkibiy qismlari konsentratsiyasi 10-30% RuO_2 zarralari va qo'rg'oshin borosilikat shisha kukunlaridan tayyorlangan. Organik vosita ushbu ikki kukun aralashmasiga qo'shildi va oxirgi rezistorli pastalar yaxshilab aralashtirildi. Keyin rezistorli pastalar 10 daqiqa davomida turli haroratlarda ($750^\circ C$, $850^\circ C$ va $950^\circ C$) pishirildi. Har bir holat uchun uchta qalin qatlamli rezistor namunasi mavjud.

Xususiyatlarni o'lchash. Batafsil harorat xarakteristikasi ma'lumotlarini olish uchun qalin qatlamli rezistorning qarshilik qiymatlari $10^\circ C$, $25^\circ C$ va $125^\circ C$ haroratlarda o'lchandi. TCR ning qiymatlari (3) tenglama bilan hisoblandi. [10].

$$TCR = \frac{R_{125} - R_{25}}{(125 - 25)R_{25}} \times 10^6 \text{ (ppm/}^\circ C) \quad (3)$$

Bu erda R_{25} - $25^\circ C$ dagi qarshilik, R_{125} - $125^\circ C$ da qarshilik.

Turli qarshilik qiymatlari bilan TFR ning qarshilik-temperatura xususiyatlarini taqqoslashni osonlashtirish uchun qarshilik qiymatlari quyidagicha normalashtirildi:

$$R_N = \frac{R(T) - R_{25}}{R_{25}} \quad (4)$$

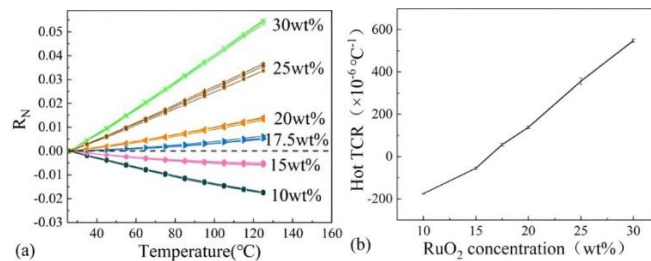
Bu erda R_N - normalashtirilgan qarshilik koeffitsiyenti, $R(T)$ - T haroratda o'lchangan qarshilik.

O'lchov omilini o'lchash uch nuqtali egilish testi orqali amalga oshirildi [17]. Uch nuqtali egilish yuki bilan qalin qatlamli rezistorlarning nisbiy qarshilik o'zgarishi (ΔR) o'lchandi va qalin qatlamli rezistorning deformatsiyasi (ϵ) uch nuqtali egilish uchun nazariy formula bo'yicha hisoblab chiqildi. Shunday qilib, qalin qatlamli rezistorlarning GF (5) formula yordamida aniqlanadi.

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (5)$$

Bu erda R - rezistorning qarshiligi, ΔR - deformatsiya natijasida yuzaga keladigan qarshilik o'zgarishi va ϵ - deformatsiya.

Natijalar. Ushbu qismda RuO_2 metal oksidining 10-30% konsentratsiyasiga ega qalin qatlamli rezistorlarning qarshilik-temperatura xususiyatlari muhokama qilindi. Namuna $850^\circ C$ da 10 daqiqa davomida ushlab turildi. Tayyor bo'lgan qalin qatlamli rezistorning normalashtirilgan qarshilik koeffitsiyentining past haroratlarda ($0^\circ C$ dan $160^\circ C$ gacha) o'zgarishi va TCR ning RuO_2 konsentratsiyasiga bog'liqligi o'rganildi (1-rasm).



1-rasm.(a) Normalashtirilgan qarshilik koeffitsiyentining haroratga nisbatan; (b) TCR ning RuO_2 konsentratsiyasiga nisbatan bog'liqligi

1a-rasmda ko'rsatilganidek, qalin qatlamli rezistorlarning normalashtirilgan qarshilik koeffitsiyenti past haroratlarda ($0^\circ C$ dan $160^\circ C$ gacha) haroratning oshishi bilan asosan to'g'ri chiziqlar bo'ylab o'zgaradi. Turli xil RuO_2 konsentratsiyasiga ega qalin qatlamli rezistorlarning haroratga sezgirliigi ham har xil bo'ladi. RuO_2 konsentratsiyasi past bo'lganda (10,15%), qalin qatlamli rezistorlar salbiy qarshilik-temperatura xususiyatlarini ko'rsatadi, normalashtirilgan qarshilik koeffitsiyenti harorat oshishi bilan kamayishini ko'rishimiz mumkin. Boshqa tomondan, yuqori RuO_2 konsentratsiyasiga ega bo'lgan qalin qatlamli rezistorlarning qarshilik-harorat ko'rsatkichlari ijobiylikni ko'rishimiz mumkin. Supero'tkazuvchi fazaning konsentratsiyasi oshgani sayin, qarshilik va harorat o'rtasidagi salbiy munosabat musbatga aylanadi. 1b-rasm qalin qatlamli rezistorlarning TCRlari RuO_2 konsentratsiyasining funksiyasi sifatida chizilgan. Qalin qatlamli rezistorlarning TCRlari -200 dan 600 ppm/ $^\circ C$ gacha bo'lgan soxada RuO_2 konsentratsiyasining ortishi bilan ortadi. Bu vaqtda harorat o'zgarishi bilan qalin qatlamli rezistorlarning qarshilik qiymati o'zgarishsiz qoladi.

Demak namuna 10 daqiqa davomida $850^\circ C$ da pishirilsa, 15% RuO_2 bo'lgan qalin qatlamli rezistorlar haroratga eng kam sezgir rezistor bo'ladi. Rezistor pastalarining RuO_2 konsentratsiyasini o'zgartirish orqali haroratga sezgirlikni keng diapazonda o'zgartirish mumkin, ammo TCR ni 0 ga yaqin qilish qiyin.

Xulosa. Har xil RuO_2 konsentratsiyasidan tayyorlangan qalin qatlamli rezistorlar Al_2O_3 tagligida har xil pishirish haroratlarida pishirildi. Qalin qatlamli rezistorning harorat xarakteristikalari, o'lchov omili va qatlam qarshiligi o'rganildi. Ushbu tadqiqotning asosiy natijalari quyidagicha umimlashtiriladi:

- TCR ning qiymati RuO_2 konsentratsiyasini va pishirish haroratini o'zgartirish orqali boshqarilishi mumkin. TCRning qiymati RuO_2 konsentratsiyasi va pishirish haroratining oshishi bilan ortadi. Xuddi shu taglik va bir xil rezistorlar seriyasini ko'rib chiqayotganda, TCR oxir-oqibat qalin qatlamli rezistorlarning qatlam qarshiligiga bog'liq ekanligi aniqlandi

- Turli qatlam qarshiligiga ega qalin qatlamli rezistorlarni tanlash orqali qarshilik harorati egri chizig'ining eng past nuqtasini (T_{min}) sozlash mumkin. Shunday qilib, turli xil muhit haroratlar uchun past haroratlarini sezmaydigan tenzodatchiklarga erishish mumkin.

ADABIYOTLAR

1. S.A.A. Jabir, N.K. Gupta, Condition monitoring of the strength and stability of civil structures using thick film ceramic sensors, *Measurement*.46 (7) (2013) 2223-2231.
2. X. Guan, M. Wen, H. Li, J. Ou, Strain sensor made by thick-film resistors on substrates of glass ceramic, in: 11th IWSHM2017: Real-Time Material State Awareness and Data-Driven Safety Assurance, Vol. 2, DEStech Publications, Stanford, CA, United states, 2017, pp. 1961-1968.
3. Z. Zhou, J. Ou, Techniques of temperature compensation for FBG strain sensors used in long-term structural monitoring, in: *Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics II*, Vol. 5851, SPIE, 2005, pp.
4. V. Sundararaman, V.T. Rathod, D.R. Mahapatra, Temperature compensation in CNT-composite distributed strain sensors, in: *SPIE Smart Structures and Materials Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, Vol. 9436, SPIE, 2015, pp. 7.
5. X. Dong, X. Yang, C.-L. Zhao, L. Ding, P. Shum, N.Q. Ngo, A novel temperature-insensitive fiber Bragg grating sensor for displacement measurement, *Smart Materials and Structures*.14 (2) (2005) N7-N10.
6. M. Song, B. Lee, S.B. Lee, S.S. Choi, Interferometric temperature-insensitive strain measurement with different-diameter fiber Bragg gratings, *Opt. Lett.*22 (11) (1997) 790-792.
7. V. Bhatia, D.K. Campbell, D. Sherr, T. D'Alberto, N. Zabaronick, G.A.T. Eyck, K.A. Murphy, R.O. Claus, Temperature-insensitive and strain-insensitive long-period grating sensors for smart structures, *Optical Engineering*.36 (7) (1997) 1872-1876, 1875
8. Y.L. Zheng, J. Atkinson, R. Sion, Z.G. Zhang, A study of some production parameter effects on the resistance-temperature characteristics of thick film strain gauges, *J Phys D Appl Phys*.35 (11) (2002) 1282-1289.
9. M. Hrovat, A. Bencan, D. Belavic, J. Holc, G. Drazic, The influence of firing temperature on the electrical and microstructural characteristics of thick-film resistors for strain gauge applications, *Sensor Actuat a-Phys*.103
10. K. Adachi, H. Kuno, Effect of glass composition on the electrical properties of thick-film resistors, *Journal of the American Ceramic Society*.83 (10) (2000) 2441-2448.
11. L. Joon, R. Vest, Firing Studies With a Model Thick Film Resistor System, *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*.6 (4) (1983) 430-435.
12. H. Tian, H.-t. Liu, H.-f. Cheng, Microstructural and electrical properties of thick film resistors on oxide/oxide ceramic-matrix composites, *Ceramics International*.41 (2) (2015) 3214-3219.
13. G.E. Pike, C.H. Seager, Electrical properties and conduction mechanisms of Ru-based thick-film (cermet) resistors, *Journal of Applied Physics*.48 (12) (1977) 5152-5169.
14. N.F. Mott, Conduction in glasses containing transition metal ions, *Journal of Non-Crystalline Solids*.1 (1) (1968) 1-17.
15. R.M. Scarisbrick, Electrically conducting mixtures, *Journal of Physics D: Applied Physics*.6 (17) (1973) 2098.
16. A. Cattaneo, M. Cocito, F. Forlani, M. Prudenziati, Influence of the Metal Migration From Screen-and-Fired Terminations on the Electrical Characteristics of Thick-Film Resistors, *ElectroComponent Science and Technology*.4 (3-4) (1977) 205-211.
17. J. Shah, Strain Sensivity of Thick-Film Resistors, *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*.3 (4) (1980) 554-564.