ISNN:2181-1296



SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ШАРОФА РАШИДОВА

SAMARKAND STATE UNIVERSITY NAMED AFTER SHAROF RASHIDOV

ILMIY AXBOROTNOMA

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
SCIENTIFIC JOURNAL

ANIQ VA TABIIY FANLAR SERIYASI

Matematika, Mexanika, Informatika
Fizika, Kimyo, Biologiya, Geografiya

№ 1/1 (137)
2023

ISSN 2181-1296

ILMIY AXBOROTNOMA

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК SCIENTIFIC JOURNAL

2023-yil, 1-son (137/) ANIQ VA TABIY FANLAR SERIYASI

Matematika, Mexanika, Informatika, Fizika, Kimyo, Biologiya, Geografiya

Samarqand viloyat matbuot boshqarmasida ro‘yxatdan o‘tish tartibi 09-25.
Jurnal 1999-yildan chop qilina boshlagan va OAK ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR **R. I. XALMURADOV, t.f.d., professor**
BOSH MUHARRIR O‘RINBOSARLARI: **H.A. XUSHVAQTOV, f-m.f.d., dotsent**
A. M. NASIMOV, t.f.d., professor

TAHRIRIYAT KENGASHI:

ANIQ FANLAR

SH.A.ALIMOV - O‘zFA akademigi
S.N.LAKAYEV - O‘zFA akademigi (SamDU)
M.M.MIRSAIDOV - O‘zFA akademigi
A.S.SOLEEV - f.-m.f.d., professor (SamDU)
I.A.IKROMOV - f.-m.f.d., professor (SamDU)
B.X.XO‘JAYAROV - f.-m.f.d., professor (SamDU)
A.G.YAGOLA - f.-m.f .d., professor (Moskva davlat universiteti, Rossiya)
I.I.JUMANOV - f.-m.f .d., professor (SamDU)
X.X.XUDOYNAZAROV - t.f.d., professor (SamDU)
ALBERTO DEL BIMBO - Florensiya universiteti professori, Italiya
L.SABIROV - f.-m.f .d., professor (SamDU)
A.JUMABOYEV - f.-m.f .d., professor (SamDU)
N.N.NIZAMOV - f.-m.f.d., professor (SamDU)
O.Q.QUVONDIQOV - f.-m.f.d., professor (SamDU)
I.A.RAXMATULLAYEV - f.-m.f .d., professor
A.SH.YARMUXAMEDOV - f.-m.f.n., (SamDU)
X.S.XAYDAROV - f.-m.f .n., dotsent (SamDU)

TABIY FANLAR

M.X.ASHUROV - O‘zFA akademigi
N.B. FERAPONTOV - k.f .d., professor (Moskva davlat universiteti, Rossiya)
SH. M. TUGIZOV - professor, Koliforniya universiteti, AQSh
H. I. AKBAROV - k.f.d., professor (O'zMU)
E. A. ABDURAXMONOV - k.f.d., professor (SamDU)
N. K. MUXAMADIYEV - k.f.d., professor (SamDU)
L. A. BULAVIN - Kiev milliy universiteti professori, Ukraina
X. Q. XAYDAROV - b.f.d., professor (SamDU)
Z. I. IZZATULLAYEV - b.f.d., professor (SamDU)
Sh. T. XOLIQULOV - g.f.d., professor (SamDU)
S. B. ABBASOV - g.f.d., professor (SamDU)
Q. S. YARASHEV - g.f.d., professor (SamDU)
GUN-SIK PARK - Seul univeriteti professori, Koreya
D.B.XURSANOV - g.f.f.d., dotsent (SamDU)
M. S. QUZIYEV - b.f.f.d., dotsent (SamDU)

Obuna indeksi – yakka tartibdagi obunachilar uchun **- 5583,**
tashkilot, korxonalar uchun **- 5584**

MUNDARIJA

Faraz Mehmood, Soleev A. *New generalization of ostrowski-grüss like inequality on time scales*……..	2-9
Alimov A.A. *On the properties of solutions of a nonlinear filtration problem with a source and multiple nonlinearities*.....	10-17
Axatov A.R., Tojiyev M.R. *Fazo-vaqt tahlili va tayanch vektor mashinasi asosida yong'inni tezkor aniqlash algoritmi*……	18-25
Байжуманов А.А. *Проблемы минимизации специальных дизъюнктивных нормальных форм сложных конъюнкций высказываний систем нелинейных булевых уравнений*……	26-30
Djuraev A.S., Obidov A.E. *Pedagogik kadrlar malakasini oshirish uchun moslashuvchan elektron ta'lim tizimini modellashtirish*	31-39
Иванов А.К., Мухамедов А.К., Шаронов И.А., Эшбуриев Р.М. *Об измерении радиоактивности мукомольно-крупяной пищевой продукции*.....	40-46
Ishankulov A.F., Tursunova N.R., Ergasheva D.R., Khalilov K.F., Galyametdinov Y.G., Mukhamadiyev N.K. *Obtaining semiconductor CdS, CdSe AND CdSe/ZnS core/shell nanoparticles and their composites with polymers*……	47-51
Шодиев Д.С., Хайруллаев М., Махмудов Ш. *О задаче коши для бигармонического уравнения* ……	52-57
Рахматуллаев И.А., Ботиров Х.З., Курбонов А.К., Хайдаров Х.С., Ахмедова Ш.Ш, Абдирахматова М.П. *Способ регистрации слабых оптических сигналов с помощью резонаторных кювет и импульсно-периодических лазерных источников*……	58-65
Jo'rakulov I.T., Umrzoqov F.B. $Ge_2Sb_2Te_5$ *yupqa qatlam plyonkalarining solishtirma kontakt qarshiligini o'rganish*……	66-71
Ikromova D.I. *On the sharp estimates for the fourier transform of measures supported to surfaces related with* E_8 *type singularities*……	72-83
Arziqulov M.M., Shermuxamedov U.A. *Urganch shahri iqlimiy ko'rsatgichlarining o'zgarishi va atmosfera gazlari konsentratsiyasiga bog'liqligi*.....	84-88
Komilova N.K., Maxmudov B.X. *Geokriminogen vaziyat va uni tadqiq etishdagi yondashuvlar*……	89-94
Fayzullayev N.I., Tillayev S.U., Mamirzayev M.A. *Metandan nanouglerod va vodorod olish reaksiyasi tezligiga turli omillarning ta'siri*.....	95-101
Djabbarov O.R., Zaripova A.R., Sodiqova U.U. *Divergent ko'rinishdagi biologik populyatsiya sistemalarining avtomodel yechimlari asimptotikasi*....	102-106
Tursunova N.G., Musulmanov N.H., Fayzullaev N.I. *Mezog'ovakli uglerod sintezining maqbul sharoitini tanlash*……	107-116
Бурнашев В.Ф., Кайтаров З.Д. *Численное исследование многофазной фильтрации в деформируемой пористой среде с учетом внешнего воздействия*……	117-130
Turayeva B.I., Kutliyeva G.J., Zuhritdinova N.Y., Kamolova X.F., Maxkamov A. *Tokdan ajratib olingan bakteriyalarning uzum fitopatogen mikromitsetlariga nisbatan antifungal xususiyatlari*.....	131-135
Mardonov J.A. *Uch o`lchovli fazoda laplas maydoni uchun karleman formulasi*……	136-140

UDK: 517.311.4+517.312.6 **DOI: https://doi.org/10.59251/2181-1296.2023.v1.1.1841**

$Ge_2Sb_2Te_5$ YUPQA QATLAM PLYONKALARINING SOLISHTIRMA KONTAKT QARSHILIGINI O'RGANISH

I.T.Jo'rakulov[1], F.B.Umrzoqov[2]
[1]*Moskva fizika-texnika instituti,*
[2]*Samarqand davlat universiteti*
jurakulov1996@bk.ru

Annotatsiya. Bu tadqiqotda Al, Ni, Ti, W metal elektrodlari va $Ge_2Sb_2Te_5$ yupqa qatlam plyonkalari o'rtasidagi kontakt qarshiliklari uzatish liniyasi usuli bilan tekshirildi TLM (TLM-Transmission line method). $Ge_2Sb_2Te_5$/elektrodning elektr xususiyatlariga issiqlik ta'siri o'rganildi. 155-160°C oraliqda issiqlik ta'siri $Ge_2Sb_2Te_5$ yupqa qatlam plyonkasining kristallanishi tufayli kontakt qarshiligining sezilarli kamayishiga olib keladi. Kontakt qarshiligining $Ge_2Sb_2Te_5$ va metal elektrodlar kontaktining umumiy kontakt qarshiligiga qo'shgan xissasi tahlil qilindi.Tahlil shuni ko'rsatdiki kristall holatdagi $Ge_2Sb_2Te_5$ qatlam plyonkasi uchun solishtirma kontakt qarshiligining umumiy qarshilikka qo'shgan xissasi yetarli darajada oshib borishini ko'rsatdi va optimal metal elektrod W uchun solishtirma kontakt qarshiligi $\rho_c = 6{,}0\cdot10^3$ Om·cm^2.

Kalit so'zlar: Energiya talab qilmaydigan fazali xotira, $Ge_2Sb_2Te_5$, uzatish uzunligi metodi (TLM), kontakt qarshiligi,solishtirma kontakt qarshilihgi.

Исследование удельного контактного сопротивления тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$

Аннотация. В данном исследовании контактное сопротивление между металлическими электродами Al, Ni, Ti, W и тонкой пленкой $Ge_2Sb_2Te_5$ исследовалось метод линии передачи TLM (метод линии передачи TLM). Исследовано влияние тепла на электрические свойства электрода/$Ge_2Sb_2Te_5$. Тепловое воздействие в диапазоне 155-160°C вызывает значительное снижение контактного сопротивления за счет кристаллизации пленки $Ge_2Sb_2Te_5$. Проанализирован вклад контактного сопротивления в общее контактное сопротивление контакта $Ge_2Sb_2Te_5$ и металлического электрода. Анализ показал, что для пленки $Ge_2Sb_2Te_5$ в кристаллическом состоянии вклад удельного контактного сопротивления в общее сопротивление значительно возрастает, а для оптимального металлического электрода W удельное контактное сопротивление $\rho_c = 6{,}0\cdot10^3$ Om·cm^2.

Ключевые слова: Энергонезависимая память с фазовым переходом, $Ge_2Sb_2Te_5$, метод линий передачи (TLM), контактное сопротивление, удельное контактное сопротивление.

Study of the specific contact resistance OF $GE_2SB_2TE_5$ Thin layer films

Abstract. In this study, the contact resistance between Al, Ni, Ti, W metal electrodes and $Ge_2Sb_2Te_5$ thin film was investigated by the transmission line method-TLM. The effect of heat on the electrical properties of the $Ge_2Sb_2Te_5$/electrode was studied. Heat exposure in the range of 155-160°C causes a significant decrease in contact resistance due to the crystallization of the $Ge_2Sb_2Te_5$ layer film. The contribution of contact resistance to the total contact resistance of $Ge_2Sb_2Te_5$ and metal electrode contact was analyzed. The analysis showed that for the $Ge_2Sb_2Te_5$ layer film in the crystalline state, the contribution of the specific contact resistance to the total resistance increases sufficiently, and for the optimal metal electrode W specific contact resistance $\rho_c = 6{,}0\cdot10^3$ Om·cm^2.

Key words: Non-volatile phase-change memory, $Ge_2Sb_2Te_5$, Transmission line method (TLM), contact resistance, specific contact resistance.

Kirish. Yangi avlod xotira qurilmasini yaratish zamonaviy ilm-fan rivojlanishining dolzarb yo'nalishi hisoblanadi. Fazani o'zgartirish xotirasi (PCM-phase change memory) flesh-xotirani potentsial almashtirish sifatida istiqbolli nomzodlardan biridir. Yuqori tezlik, kam quvvat sarfi, yuqori

radiatsiya qarshiligi, ma'lumotni qayta yozishning ko'p sonli sikllari, CMOS texnologiyasi bilan mosligi (to'ldiruvchi metall-oksid-yarim o'tkazgich strukturasi) tufayli qiziqish ortib bormoqda [1].

PCM kristalli (tartibli) fazadan amorf (tartibsiz) fazaga va aksincha o'tishi mumkin bo'lgan xalkogenid yarimo'tkazgichli birikma $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST225) yordamida ma'lumotlarni yozib oladi [2].

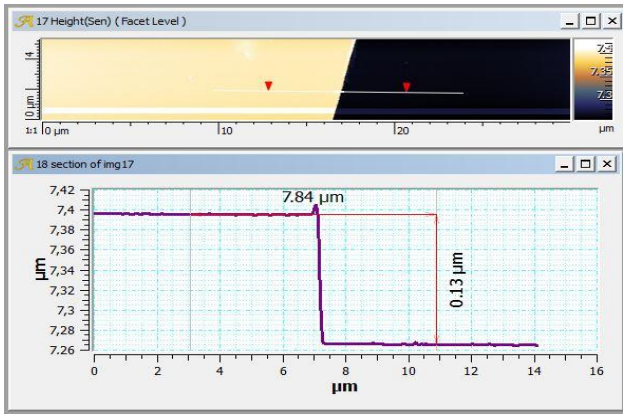
PCM-da SET va RESET operatsiyalari past qarshilikka ega kristalli holat va yuqori qarshilikka ega amorf holat o'rtasidagi teskari faza o'tishiga asoslangan. PCM ning ishlash printsipi shundan iboratki, materialni past qarshilikli kristal holatiga o'tkazish uchun uzoq past quvvatli impuls (SET), PCM qurilmasini yuqori qarshilikli amorf holatga o'tkazish uchun qisqa yuqori amplitudali impuls (RESET) ishlatiladi [3].

Faol tadqiqotlarga qaramay, PCM qurilmalarining bir qator hal etilmagan texnologik muammolari, xususan, dasturlashtiriladigan soha qatlamiga past kontakt qarshiligi bo'lgan metall qatlamlarni shakllantirish texnologiyasini optimallashtirish saqlanib qolmoqda. Muammolardan biri elektrod/ $Ge_2Sb_2Te_5$ kontakt qarshiligini kam o'rganlishidir, chunki u umumiy qarshilikka sezilarli xissa qo'shishi mumkin. Umumiy qarshilik metallning qarshiligini, metall va yarimo'tkazgich o'rtasidagi kontakt qarshiligini, yarimo'tkazgichning qarshiligini va yarimo'tkazgichning bevosita kontakt ostidagi sirt qarshiligini o'z ichiga oladi. Metalning qarshiligi umumiy qarshilikka nisbatan inobatga olmas ham bo'ladi. Shuning uchun, bu ishda biz metal elektrod/$Ge_2Sb_2Te_5$ sohasining kontakt qarshiligini o'rgandik.

Shu munosabat bilan, ushbu ishning maqsadi temperaturaning elektrod/yupqa $Ge_2Sb_2Te_5$ qatlam plyonkasining solishtirma kontakt qarshiligiga ta'sirini o'rganishdir.

Tadqiqot metodologiyasi. Ushbu ishda magnetronli bombordirovka qilish usuli qo'llanildi. MAGNA-01 qurilmasida $Ge_2Sb_2Te_5$ yupqa qatlam plyonkalari hosil qilindi. Ushbu usulni tanlash, purkash nishonning stexiometrik tarkibiga yaqin kompozitsiyaga ega bo'lgan ko'p komponentli plyonkalarni olish va elementar tarkibni qalinligi bo'yicha bir xil taqsimlash imkoniyati bilan bog'liq. $Ge_2Sb_2Te_5$ yupqa qatlam plyonkalari olish quyidagi parametrlar bo'yicha amalga oshirildi: ishchi gaz kirishining boshlanishidan oldin kameradagi bosim 5,0 10^{-3} Pa. Argon gazining oqim tezligi 0,6 l/soatni tashkil etdi, bu esa 5,8 10^{-1} Pa ishchi bosimini olish imkonini berdi. Nishonga berilgan quvvat 25 Vt edi.

O'rganilayotgan namunalarning sirt morfologiyasi va qalinligini o'rganish atom kuch mikroskopi (Solver P47-Pro) yordamida amalga oshirildi. Bosqichda olingan profil 1-rasmda ko'rsatilgan.



1-rasm. $Ge_2Sb_2Te_5$ yupqa qatlam plyonkasi uchun atom kuch mikroskopi profili

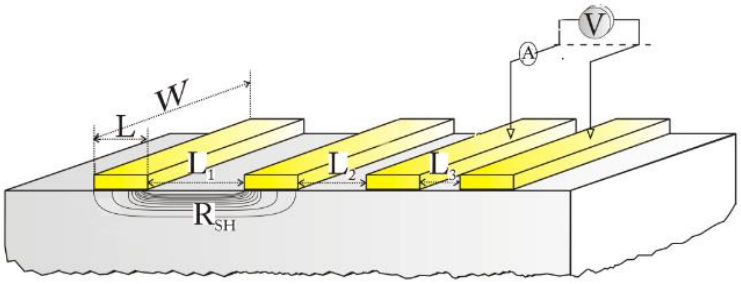
Natijada, barcha tayyorlangan namunalar uchun $Ge_2Sb_2Te_5$ yupqa qatlam plyonkalarining qalinligi 130 ± 20 nm ekanligi aniqlandi.

Issiqlik bilan ishlov berish natijasida GST225 yupqa plyonkalarning fazaviy holatini aniqlash, qarshilikning haroratga bog'liqliklarini o'rganish amalga oshirildi. Buning uchun apparat-dasturiy kompleks [4] ishlatildi, unga quyidagilar kiradi: HFS600E-PB4 Linkam termal stoli , Keithley 6485

pikoampermetri va Agilent E3647A kuchlanish manbayi. O'lchovlar 400°C gacha, argon atmosferasida 5 °C / min isitish tezligida amalga oshirildi.

Temperaturaning GST225 / elektrod strukturasining elektr xususiyatlariga ta'sirini o'rganish va metall va yarim o'tkazgich o'rtasidagi kontakt qarshiligini aniqlash uchun eng keng tarqalgan usullardan biri uzatish uzunligi metodi (Transmission Line Method - TLM) dan foydalanildi.

TLM metodi uchun uzunligi L va kengligi W bo'lgan bir xil to'rtburchaklar kontaktli konstruktsiyalar to'plami tayyorlanadi. L_1, L_2, L_3...L_n kontaktlar 2-rasmda ko'rsatilgan. Elektrodlarning geometrik parametrlari L << W [5] munosabatiga muvofiq tanlangan. GST225 yarimo'tkazgich qatlamining kengligi 4 mm, elektrodlarning uzunligi va kengligi mos ravishda 3,6 va 0,5 mm. Namuna 0,5 dan 8 mm gacha bo'lgan 8 xil elektrodlararo masofadan iborat.



2-rasm. Elektrodlarning chiziqli joylashuvi bilan namunaning sxematik tasviri [6]

Ikki qo'shni elektrod o'rtasida o'lchangan umumiy qarshilik R_T quyidagi (1) ifodadan aniqlanadi [6-8]:

$$R_T = 2\frac{L_T R_{SH}}{W} + \frac{L_i R_{SH}}{W} \quad (1)$$

bu yerda L_T - uzatish uzunligi m (tok oqimining faol uzunligi); R_{SH} - yarimo'tkazgichning sirt qarshiligi, Ohm / □; W - elektrod kengligi, m; L_i - elektrodlar orasidagi masofa, m.

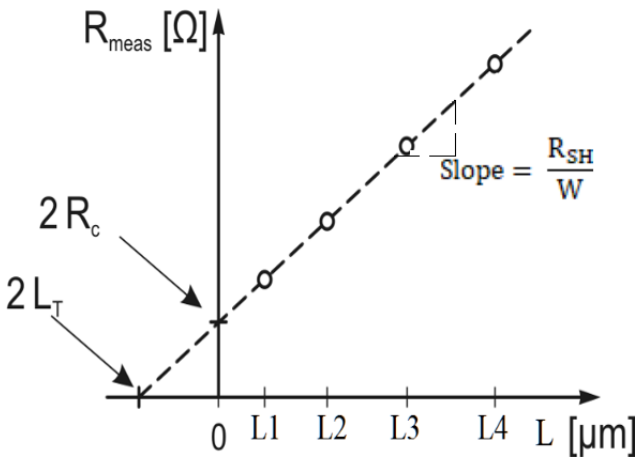
Kontakt qarshiligi RC (2) formula bo'yicha hisoblanadi:

$$R_C = \frac{L_T R_{SH}}{W} \quad (2)$$

Solishtirma kontakt qarshiligi ρ_C (3) formula bo'yicha hisoblanadi [6-7]:

$$\rho_c = L_T{}^2 R_{SH} \quad (3)$$

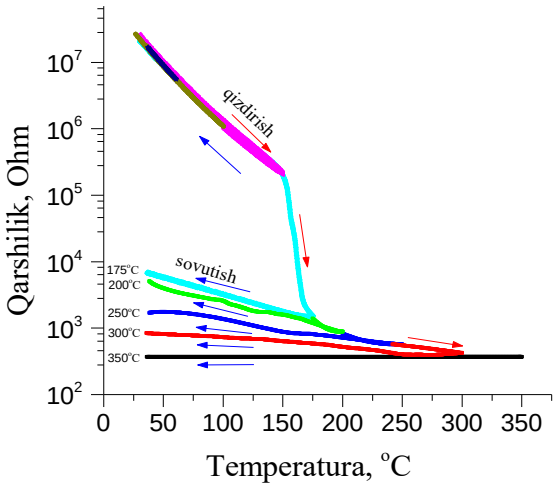
3-rasmda elektrodlarning joylashuvi uchun umumiy o'lchangan qarshilikning elektrodlar orasidagi masofaga bog'liqligini olishimiz mumkin.



3-rasm. Qarshilikning elektrodlararo masofaga bog'liqligi [6-8]

Ushbu bog'liqlikni tahlil qilish yarimo'tkazgichning sirt qarshiligini taxminiy bog'liqlikning qiyaligi tangensini topish orqali topish imkonini beradi. Ushbu chiziqni absissa va ordinata o'qlari bilan kesishgan nuqtalarga cho'zish orqali biz mos ravishda tok oqimi uzunligi L_T va kontakt qarshiligi R_C qiymatlarini aniqlashimiz mumkin. Olingan qiymatlar kontakt qarshiligining o'ziga xos parametrini topish uchun ishlatiladi.

Tahlil va natijalar. O'rganilayotgan tuzilmalarni qizdirish jarayonida qarshilik minimal elektrodlararo masofada (0,5 mm) o'lchash yo'li bilan kuzatildi. Shuningdek, ushbu tadqiqotlar $Ge_2Sb_2Te_5$ qatlam plyonkasining fazaviy holatini baholashga imkon berdi. Qarshilikning olingan haroratga bog'liqliklari 4-rasmda ko'rsatilgan.



4-rasm. $Ge_2Sb_2Te_5$ yupqa qatlam plyonkalar uchun qarshilikning haroratga bog'liqligi

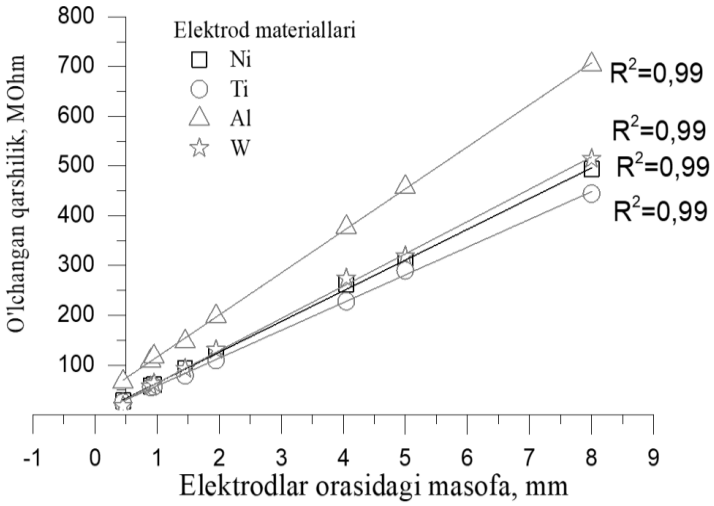
4-rasmdan ko'rinadiki struktura yuqori qarshilikka 150°C (75, 100, 125°C) temperaturada ega. Tahlili shuni ko'rsatdiki, GST225 yupqa plyonka bu temperaturalar uchun harorat bilan ishlov berish paytida amorf holatni saqlab qoladi.

Qizdirishni davom etirish shuni ko'rsatdiki, 150 dan 175°C gacha bo'lgan temperatura oralig'ida qarshilik ikki darajaga keskin kamayadi. Bu amorf holatdan NaCl tipidagi kubik tuzilishga fazali o'tishni ko'rsatadi [8-9].

Ilmiy va texnik adabiyotlarga ko'ra, 250 dan 350°C gacha bo'lgan temperatura oralig'ida ikkinchi fazaga o'tish sodir bo'ladi [8-9], bu qarshilikning sezilarli darajada kamayishi bilan birga bo'ladi.

Ushbu natijalar turli temperaturalari uchun solishtirma kontakt qarshiligining qiymatlarini baholashga imkon berdi.

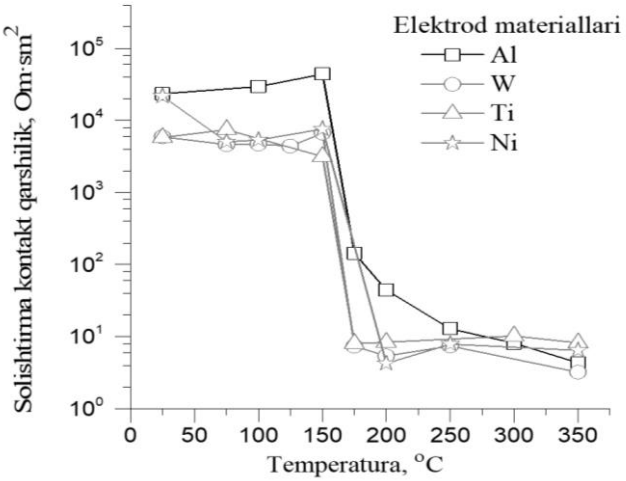
Om qonunidan foydalangan holda volt-amper xarakteristikasini o'rganish natijalariga ko'ra, ikkita qo'shni elektrodlar orasidagi R_T umumiy qarshilik qiymatlari aniqlandi. R_T ning ma'lum qiymatlaridan foydalanib, umumiy qarshilikning elektrodlararo masofaga bog'liqligi chizilgan (5-rasm).



5-rasm. Turli elektrod materiallari bilan $Ge_2Sb_2Te_5$ yupqa plyonkalar umumiy qarshiligining elektrodlar orasidagi masofaga bog'liqligi

Grafikdan ko'rinib turibdiki, olingan natijalar yuqori darajada yaqinlashish ($R^2 \geq 0,99$) bilan qarshilik elektrodlar orasidagi masofaga chiziqli bog'liq. Eng yuqori o'lchangan kontakt elektrodlar alyuminiydan yasalgan namunalar tomonidan namoyon bo'ldi. Volfram, nikel va titan elektrod namunalarштшгп qarshilik qiymatlari bir-biriga yaqin.

5-rasmda aniqlangan R_{SH} va L_T qiymatlari, shuningdek 3-formuladan foydalanib, solishtirma kontakt qarshiligi ρ_c qiymatlari hisoblab chiqilgan. 6-rasmda turli elektrod materiallariga ega bo'lgan namunalar uchun solishtirma kontakt qarshiligining harorat bog'liqligi ko'rsatilgan.



6-rasm. $Ge_2Sb_2Te_5$ yupqa plyonkalar solishtirma konrakt qarshiligining temperaturalarga bog'liqligi

6-rasmdan ko'rinib turibdiki, $Ge_2Sb_2Te_5$ amorf holatda 50 dan 150°C gacha bo'lgan temperatura oralig'ida solishtirma kontakt qarshiligining yuqori qiymatlari kuzatildi. ρ_c ning eng kichik qiymati titan va volfram elektrodlari ($6,0 \cdot 10^3$ Om·cm^2), eng kattasi esa alyuminiy va nikel elektrodlari uchun ($2,3 \cdot 10^4$ Om·cm^2). GST225 yupqa plyonkasining amorf holatdan kristall holatga o'tishi natijasida (175°C haroratda) solishtirma kontakt qarshiligi 3 darajaga kamaydi, bu esa [10-12] adabiyotlardagi natijalarga mos keladi.

Xulosa va takliflar. Natijalar shuni ko'rsatdiki, Haroratning elektrod/$Ge_2Sb_2Te_5$ yupqa plyonkasi solishtirma kontakt qarshiligiga ta'siri barcha namunalar uchun kuzatildi. Titan va volfram elektrodlari bilan amorf holatdagi namunalar solishtirma kontakt qarshiligining eng past qiymatlarga,

alyuminiy va nikel elektrodlari uchun eng yuqori qiymatlarga ega ekanligi aniqlandi. 350°C haroratda titan elektrodli namunalarning solishtirma kontakt qarshiligi eng yuqori qiymatga, volfram elektrodlari esa eng kichik qiymatga ega bo'ldi.

Shunday qilib, olib borilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, o'ziga xos kontakt qarshiligini o'rganish dolzarb vazifa bo'lib, uning echimi elektr fazali xotira texnologiyasini takomillashtirish va optimallashtirishga imkon beradi. Fazali xotira qurilmalarining ishlashini optimallashtirish uchun elektrod sifatida volfram materiallarini tanlash muhimdir.

Adabiyotlar

1. Choi J. H. WBA: Write pattern aware hybrid disk buffer management for improving lifespan of nand flash memory / J. H. Choi, K. M. Kim and J. W. Kwak // International Electron Devices Meeting. – 2020. – Vol. 66. – № 2. – P. 193-202.
2. Raoux S. Phase change materials / S. Raoux and M. Wuttig // – Boston, MA: Springer US. – 2009. – 430 p.
3. Le Gallo, M. An overview of phase-change memory device physics / M. Le Gallo and A. Sebastian // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2020. – Vol. 53. – № 21. – P. 213002.
4. Якубов А.О. Диагностика электрофизических характеристик тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$, сформированных разными методами осаждения // Труды IX Всероссийской школы семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и структур»: сборник. – 2017 – Т. 2. – С. 87-91.
5. Burr G. W. Phase change memory technology / G. W. Burr, M. J. Breitwisch, M. Franceschini, D. Garetto, K. Gopalakrishnan, B. Jackson. and B. Rajendran // Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2010. – Vol. 28. – № 2. – P. 223-262.
6. Новицкий С.В. Методологические аспекты измерения удельного контактного сопротивления TLM методом с линейной и радиальной геометрией контактов // Петербургский журнал электроники. – 2013. – № 3. – С. 59–70.
7. Shindo S. Contact resistivity of amorphous and crystalline $GeCu_2Te_3$ to W electrode for phase change random access memory / S. Shindo, Y. Sutou, J. Koike and Y. Saito // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2016. – Vol. 47. – № 1. – P. 1-6.
8. Kato T. Electronic properties of amorphous and crystalline $Ge_2Sb_2Te_5$ films / T. Kato and K. Tanaka // Japanese Journal of Applied Physics. – 2005. – Vol. 44. – № 10R. – P. 7340.
9. Vinod E. M. Direct hexagonal transition of amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ / E. M. Vinod, K. Ramesh, R. Ganesan and K.S. Sangunni // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 104. – № 6. – P. 063505.
10. Roy D. Specific contact resistance of phase change materials to metal electrodes / D. Roy, M. A. Zandt and R. A. Wolters // International Electron Devices Meeting. – 2010. – Vol. 31. – № 11. – P. 1293-1295.
11. Cooley K. A. Review of electrical contacts to phase change materials and an unexpected trend between metal work function and contact resistance to germanium telluride / K. A. Cooley, H. M. Aldosari, K. Yang and S. E. Mohney // Journal of Vacuum Science and Technology. – 2020. – Vol. 38. – № 5. – P. 050805.
12. Roy D. Contact resistance of TiW to phase change material in the amorphous and crystalline states. // International Electron Devices Meeting. – 2009. – № 2. – P. 12–15.