



„Latvijas elektrisko un optisko iekārtu ražošanas nozares
kompetences centrs”

Līguma Nr. 1.2.1.1./16/A/002

Apakšprojekts Nr.2. „Augstas pretestības rezistīvo slāņu pētījums”

Pētījums „Zināšanu iegūšana par metāla silicīda
bāzes sakausējumu sastāvu un to izmantošanas
iespējām augstas pretestības rezistīvo slāņu
izgatavošanā”

Pārskata periods
01.06.2016. – 30.11.2016.

1. PROBLĒMAS APRAKSTS

Pētījuma uzdevums ir iegūt zināšanas par metāla silīcīda bāzes sakausējumu sastāvu, ar mērķi izvēlēties piemērotākos materiālus (10nm biezuma diapazonā), ko izmantot augstas pretestības rezistīvo slāņu izgatavošanā.

Lai samazinātu mūsdienīgu elektronikas iekārtu gabarītu izmērus un uzlabotu iekārtu darbību arvien sarežģītākos ekspluatācijas apstākļos, nepieciešams uzlabot plāno kārtiņu elementu parametrus, galvenokārt rezistoriem un citiem elementiem, kam ir zema stabilitāte, salīdzinot ar diskrētajiem rezistoriem. Tiek meklēti jauni materiāli un tehnoloģijas pretestības diapazona paplašināšanai, pretestības-temperatūras koeficienta (PTK) samazināšanai, materiālu laika un termiskās nestabilitātes pazemināšanai, kas būtu izmantojami elektronikas izstrādājumos.

Izvēloties materiālus nepieciešams novērtēt ne tikai iegūstamos elektriskos parametrus, bet arī to pielietojamības tehnoloģiskumu. Šeit jāņem vērā, ka plānās rezistīvās kārtiņas īpašību atkarība no biezuma noteiktā biezumu diapazonā ir nelineāra. Ja netiek nodrošināts nepieciešamais strāvas blīvums, tad arī tāda rezistīvā elementa pielietošana nav mērķtiecīga.

Pirmā pētījuma gaitā tiks novērtēti 4 dažādi materiāli (sakausējumi) no elektrisko parametru un tehnoloģiskuma viedokļa. Ja vērtējamajam sakausējumam ir izcilas tehnoloģiskās īpašības, bet tas pilnībā neapmierina uzdotos elektriskos parametrus, to ir vērts atstāt tālākai izpētei ar mērķi atrast jaunus tehnoloģiskus risinājumus, kas ļautu iegūt vajadzīgās īpašības.

Par salīdzinājuma etalonu tiks izmantots sakausējums Nr.1 ar īpatnējo pretestību $1 \text{ k}\Omega/\square$, kas šobrīd tehnoloģiskajā procesā tiek izmantots kā pamata sakausējums. Savukārt sakausējumi Nr.2, Nr.3 un Nr.4 ir jaunie jeb pētāmie sakausējumi, kas ir speciāli izvēlēti šī pētījuma veikšanai un ir šī pētījuma objekti.

2. EKSPERIMENTU APRAKSTS

Lai iegūtu zināšanas, pētījuma gaitā veicot visus nepieciešamos eksperimentus, tika veiktas vienvienveidīgas darbības, ko var apkopot četros etapos:

1. Rezistīvā materiāla kārtiņas uzputināšana uz divu veidu plāksnēm: pirmā (testa) turpmāk tiek izmantota rezistīvās kārtiņas parametru mērīšanai, otrā (darba) turpmāk tiek izmantota rezistoru parametru mērīšanai.
2. Rezistoru izgatavošana uz otrās plāksņu grupas
3. Iegūto rezistīvo kārtiņu un iegūto rezistoru parametru mērīšana
4. Iegūto rezultātu novērtēšana

Rezistīvā slāņa uzputināšana notiek magnetrona kamerā, izmantojot pulverveida sakausējumu ar izmēriem 90x220 mm. Vienlaicīgi (tajā pašā kamerā), lai kontrolētu R_s , uz keramiskā pavadoņa/plakšnes tiek uzklāts rezistīvais slānis, paralēli mērot virsmas pretestību ar 4-zondu metodi.

Sakausējumu sastāvs tika noteikts, materiāla fragmentus pārbaudot ar testa plāksni, izmantojot elektronisko mikroskopu (viengabala fragments) un spektroskopu (fragments tika saberzts pulverī). Rezistīvās kārtiņas biezums (arī uz testa plāksnes) tika mērīts ar profilometra palīdzību LU Cietvielu fizikas instiūtā (LU CFI). Lai to izdarītu, rezistīvā kārtiņa ar noteiktu soli tika kodināta līdz pamatnei. Mērījumiem izmantots CEM/spektrometrs Phenom ProX (palileinājums līdz 12x; izšķirtspēja <10nm;) un profilometrs Dektak150 (*Surface Profile Measurement System*).

Iegūto rezistīvo kārtiņu virsmas pretestība R_s tika izskaitļota pēc šādas formulas (1), izmantojot zināmu rezistoru izmērus:

$$R_s = \frac{R_{rez}}{N}, \quad (1)$$

kur R_{rez} – rezistora pretestība, N – rezistora izmērs kvadrātos (mūsu gadījumā $N=7.56$ neņemot vērā kodinātāju). Pretestība R_{rez} tika mērīta ar ommetru 5 punktos darba plāksnē (

Lai noteiktu rezistoru pretestības-temperatūras koeficientu (PTK), tika veikti rezistoru pretestības mērījumi pēc plāksnes uzkaršanās līdz 125°C . Pēc tam PTK ($\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$) tika mērīts ar (2) formulas palīdzību

$$PTK = \frac{R_{rez}(T_2) - R_{rez}(T_1)}{R_{rez}(T_1) \cdot (T_2 - T_1)} \cdot 10^6, \quad (2)$$

kur $R_{rez}(T_1)$ – rezistora pretestība pie temperatūras $T_1 = 25^{\circ}\text{C}$, $R_{rez}(T_2)$ – rezistora pretestība pie temperatūras $T_2 = 125^{\circ}\text{C}$.

Tāpat arī eksperimentu laikā tika noskaidrots, kā rezistīvais slānis uzvedas pēc rūdīšanas (straujas atdzišanas). Lai to panāktu, R_s tika mērīts divreiz: pirms un pēc rūdīšanas un tika aprēķināts δR_s pēc (3) formulas

$$\delta R_s = \frac{R_{sa} - R_s}{R_s}, \quad (3)$$

kur R_{sa} – rezistīvās kārtiņas virsmas pretestība pēc rūdīšanas.

3. SECINĀJUMI UN IEGŪTĀS ZINĀŠANAS PAR METĀLA SILICĪDA BĀZES SAKAUSĒJUMU SASTĀVU

Visiem izpētītajiem sakausējumiem tika novērota liels nevienmērīgums materiālu izklienē uz virsmas, pat neskatoties uz to, ka šo sakausējumu izveidē tika pielietota par precīzu un efektīvu uzskatītā sprādzienveida maisīšanas metode. Līdz ar to ir izdarāms secinājums, ka sakausējuma izmēru palielināšana to izveides procesā ļautu sabalansēt materiālu izkliedi uz virsmas un pietuvināt to uzdotajam materiālu sastāvam, tādējādi padarot procesu vairāk prognozējamu. Tomēr tas ir tehniski sarežģīti izdarāms, jo ir ierobežotas tehnoloģijas iespējas (izmēri). Līdz ar to materiālu izklienē uzlabošanai atliek izmantot uzputināšanai paredzētā laika palielināšanas metodi, kas savukārt ir pretrunā ar prasību iegūt rezistorus ar augstu pretestību.

Sakausējumi Nr.2, Nr.3 un Nr.4 uzrādīja tehnisko iespējamību izveidot rezistīvās kārtiņas 5 kΩ/□ diapazonā. Tomēr katram no tiem novērotas būtiskas kvalitātes atšķirības vienam no otra.

Sakausējums Nr.2. uzrādīja augstu atkārtojamību pie nomināla 5 kΩ/□ (lielāks uzputināšanas laiks – lielāka precizitāte) un tehnoloģisko operāciju stabilitāti (nelielas nominālu izmaiņas pēc viena no standarta rūdīšanas veida). Tomēr šajā gadījumā novērots augsts PTK (vairāk nekā 250 ppm/°C). Šis materiāls uzrādīja būtiskas īpašību izmaiņas pie slāņa īpatnējās pretestības 10 kΩ/□ vērtībā, kas paredz tālākus optimālās pretestības meklējumus diapazonā 5-10 kΩ/□. Tas nozīmē, ka šāda veida sakausējums var tikt izmantots turpmākajos šī pētījuma projekta etapos, ņemot vērā, ka nepieciešams atrast optimālāku īpatnējo pretestību un rūdīšanas režīmi, lai samazinātu PTK. Pat ja netiks atrasts veids, kā samazināt PTK, šāda sakausējuma pielietošana ir perspektīva integrālo mikroshēmu izstrādē, ko pamato šī materiāla īpatnējā pretestība.

Sakausējums Nr.3. pie uzdotā mērķa 5 kΩ/□ uzrādīja salīdzinoši mazu slāņa biezumu – 8 nm, kas nākotnē paredz grūtības tā integrēšanā mikroshēmā (droša kontakta izveidošanas grūtības). Mērījumi parādīja, ka tieši pie šīs īpatnējās pretestības vērtības sākas materiāla īpašību izmaiņas atkarībā no slāņa biezuma. Šis sakausējums uzrādīja lieluma vērtības izmaiņas, pretestības izmaiņas termoapstrādes laikā (stabilitāte) pie īpatnējām pretestībām robežās 3-4 kΩ/□. T.i. šim materiālam iespējams optimālais īpatnējās pretestības vērtību punkts tajā diapazonā, kur tā lielums tikai nedaudz mainīsies sekojošo procesu rezultātā. Lielākie šī sakausējuma trūkumi ir lielā PTK vērtība, kas nav atkarīga no R_s nomināla. Šis secinājums uzskatāms par vienu no negaidītākajiem atklājumiem, jo pie sakausējuma izgatavošanas tika paredzēts, ka šis sakausējums būs stabilāks. Iespējams paredzēt, ka sakausējuma izgatavošanas laikā, pateicoties

tehnoloģiskajām īpatnībām, izveidojās savienojumi, kas atšķiras no paredzamajiem pie vienas un tās pašas masas koncentrācijas līmeņa.

Materiāls Nr. 4. pētījumu rezultātā izrādījās visperspektīvākais. Tas parādīja iespēju sasniegt vajadzīgo īpatnējās pretestības līmeni pie saprātīga tehnoloģiskā biezuma apmēram 20nm vērtībā un stabilitāti rūdīšanas procesā. Tomēr pie pieprasītās pretestības ($5 \text{ k}\Omega/\square$) TKC izrādījās pārāk augsts - 150-250 ppm/C diapazonā.

Kopējais secinājums

Visi pirmajā pētījuma etapā izvērtētie sakausējumi neatbilst pilnā mērā izvirzītajām prasībām, izmantojot rezistīvo slāņu izveides un apstrādes standarta metodes. Lai sasniegtu uzdotās prasības no vienas puses nepieciešama daudz precīzāka tehnoloģiskā procesa ieregulēšana, no otras puses nepieciešams ieviest jaunus tehnoloģiskos procesus, kas ļautu izmainīt rezistīvās slāņa sastāvu tā izveides procesā.

Balstoties uz pētījuma rezultātiem, var secināt, ka visi trīs apskatītie sakausējumi ir perspektīvi un veiktais pētījums un iegūtās zināšanas kalpo kā pamatojums nākamās pētījuma aktivitātes veikšanai.