

Vastagréteg modell áramkörök segítségével végzett megbízhatósági vizsgálatok

ETO 621.3.049.772.1: 621.3.019.3

A megbízhatósági vizsgálatok során alkalmazott modell áramkörök közös jellemzője, hogy ezen áramkörök eleve nem üzemszerű felhasználásra készülnek, hanem kimondottan arra szolgálnak, hogy segítségükkel az egyes áramköri elemek különböző igénybevétel hatására bekövetkező paraméterváltozásai meghatározhatóak legyenek.

Arra, hogy milyen esetekben merül fel modell áramkörök megmintázásának, illetve vizsgálatának szükségessége, a vastagréteg integrált áramkör megbízhatósági modelljéből kiindulva mutatunk rá. Természetesen az alkalmazott modell csupán közelítés és csak a legfontosabb összetevőket tartalmazza. A kísérleti részben a HIKI technológiai részlegei által tervezett és megmintázott vastagréteg modell áramkörök segítségével végzett megbízhatósági vizsgálatok főbb eredményeit ismertetjük.

1. Megbízhatósági modell

Ha a vastagréteg áramkört megbízhatósági szempontból soros kapcsolású rendszernek tekintjük és feltételezzük, hogy az áramkör egy elemének meghibásodása a többi elem megbízhatóságát nem befolyásolja; úgy az áramkör csak akkor működhet t ideig, ha minden alkatrésze működik t ideig. Ekkor az áramkör megbízhatósága:

$$R(t) = R_i(t), \quad (1)$$

ahol $R_i(t)$ az i -edik elem megbízhatóságát jelenti. A modellben azon elemek megbízhatóságát, amelyek megbízhatósági vizsgálata azonos szempontok szerint végezhető, célszerű összevontan kezelni. Az összevonas alkalmával a következő, az áramkörön belüli elemcsoportok megbízhatóságát vesszük figyelembe:

- az áramkör alapját képező passzív hálózat megbízhatósága;
- a hálózatba utólagosan „beültetett” alkatrészek megbízhatósága;
- az áramkör tokozásának a megbízhatósága.

Feltételezve, hogy az egyes áramköri elemek meghibásodási rátája (λ_i) a hasznos működési idő alatt állandó, úgy ismert összefüggések alapján (1) a következő alakú:

$$R(t) = \exp(-t \sum \lambda_i) = e^{-t \lambda_A} \quad (2)$$

ahol $\sum \lambda_i = \lambda_A$ az áramkör meghibásodási rátája. Így az áramkör elemeinek a) ... c) pontok szerinti csoportosítását alkalmazva, az áramkör meghibásodási rátájára nyerjük:

sodási rátájára nyerjük:

$$\lambda_A = \lambda_{Há} + \sum \lambda_{Be} + \lambda_{To}, \quad (3)$$

ahol:

- $\lambda_{Há}$ — az áramkör alapját képező passzív hálózat meghibásodási rátája,
- $\sum \lambda_{Be}$ — a hálózatba beültetett alkatrészek meghibásodási rátáinak összege,
- λ_{To} — az alkalmazott tokozás, tágabb értelemben a védelem, jellemző meghibásodási rátája.

A passzív hálózat meghibásodási rátája ($\lambda_{Há}$), a hordozóra jellemző meghibásodási ráta, valamint a a szitanyomás segítségével felvitt áramköri elemek meghibásodási rátáinak összegeként adható meg:

$$\lambda_{Há} = \lambda_{Ho} + \lambda_{Ré}, \quad (4)$$

amikor is

- λ_{Ho} — a hordozó meghibásodási rátája,
- $\lambda_{Ré}$ — a hordozóra felvitt vezető-, ellenállás- és dielektrikum rétegekkel megvalósított áramköri elemek együttes meghibásodási rátája.

A szitanyomással felvitt passzív hálózatok szokásos elem készlete:

- Összeköttetéseket biztosító vezető sávok;
- R és/vagy C elemek;
- Ritkábban L elemek felnyomtatására is sor kerül [1];
- Mikrohullámú felhasználásra készített áramkörnél különféle, a mikrohullámú technikában használatos elemek;
- Többrétegű (multilayer) technikával megvalósított áramkörök esetén: vezetőréteg keresztvezetések, amikor az egymás alatt, illetve felett elhaladó vezetőrétegeket — ugyancsak szitanyomással készített — üveg, vagy újabban polyimid [2] szigetelőréteg választja el.

Tegyük fel, hogy a hálózat ellenállásokból, kondenzátorokból és rétegkeresztvezetésekkel tevődik össze, úgy $\lambda_{Ré}$ a következő összetevő λ -faktorokat tartalmazza:

$$\lambda_{Ré} = A\lambda_S + \sum \lambda_R + \sum \lambda_C + \sum \lambda_K + B\lambda_m. \quad (5)$$

Az (5) szerinti összefüggésben:

- A — a hordozó felülete,
- λ_S — az egységnyi területű hordozó meghibásodási rátája,
- $\sum \lambda_R, \sum \lambda_C, \sum \lambda_K$ — az ellenállások, kondenzátorok és keresztvezetések meghibásodási rátáinak összege,
- $B\lambda_m$ — a hálózat megbízhatóságát csökkentő gyártás-közi művelet (pl. vastagréteg eljárásnál a nyomtatás-beégetés) száma és az ehhez rendelhető karakterisztikus meghibásodási ráta szor-

zata. Irodalmi adatok szerint [3] vastagréteg eljárás esetén a nyomtatást és beégetést figyelembe vevő λ_m jellegzetes értéke:

$$4 \cdot 10^{-10} / \text{óra.}$$

A (3) összefüggésben a második tag a beültetett alkatrészek összegezett meghibásodási rátáját jelenti. Feltételezve, hogy a beültetési és az ezt követő tokozási műveletek hatására az alkatrész megbízhatósága a beültetés előtti állapothoz képest nem csökken, valamint, hogy az alkatrész rögzítése mechanikai szempontból is megfelelően történt, akkor

$$\lambda_{Be} = \lambda_{Alk} + \sum \lambda_{CSb}, \quad (6)$$

ahol:

λ_{Alk} — a beültetett alkatrész meghibásodási rátája (az alkatrész megjelölés itt a megszokottnál tágabb értelmezést nyer: pl. MSI vagy LSI áramköri chipok stb.),

$\sum \lambda_{CSb}$ — a beültetés során létesített csatlakozások meghibásodási rátáinak összege.

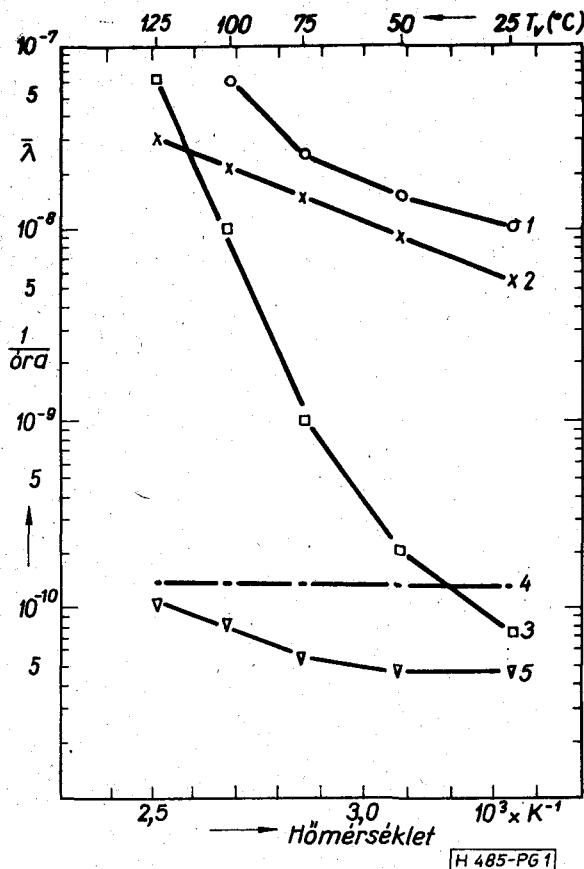
A (3) összefüggésben szereplő λ_{To} ugyancsak két fő összetevőre bontható:

$$\lambda_{To} = \sum \lambda_{CSl} + \lambda_t \cdot C, \quad (7)$$

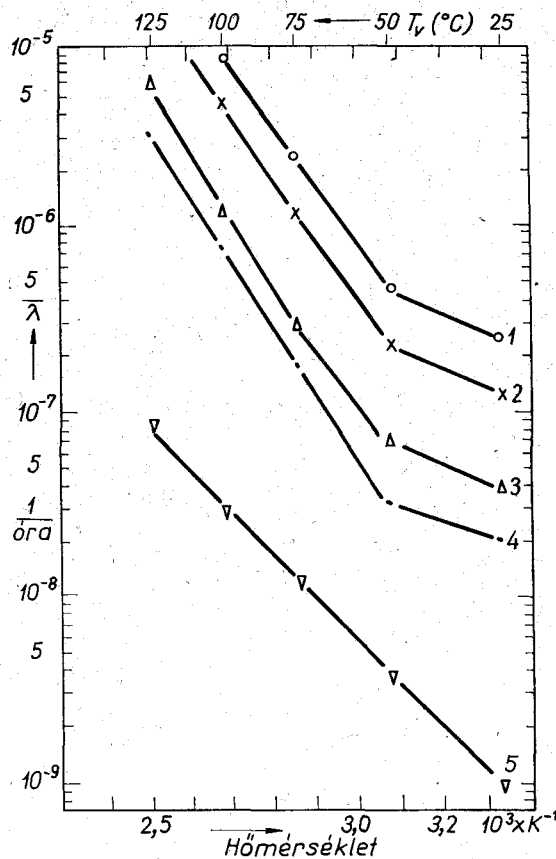
ahol:

$\sum \lambda_{CSl}$ — a tokozás alkalmával létesített csatlakozások összegezett meghibásodási rátája,

$\lambda_t \cdot C$ — a tokozásnak az áramkör megbízhatóságára



1. ábra. Passzív áramköri elemek átlagos meghibásodási rátái ($\bar{\lambda}$) a környezeti hőmérséklet függvényében: 1 — kerámia chip kondenzátor; 2 — vastagréteg ellenállás; 3 — Au—Al golyós kötés; 4 — Al—Al bondolás; 5 — vastagréteg keresztződés



2. ábra. Chip alkatrészként beültethető félvezető eszközök $\bar{\lambda}$ faktora a környezeti hőmérséklet függvényében: 1 — 50 kapu ekvivalens IC; 2 — 25 kapu ekvivalens IC; 3 — műveleti erősítők; 4 — 4 kapu ekvivalens IC; 5 — dióda és kisteljesítményű tranzisztor

gyakorolt hatását reprezentálja; λ_t a leginkább használt védelem (referencia típus) esetére vonatkozó meghibásodási ráta. Referencia tokozás alkalmazásakor: $C=1$. Ettől eltérő tokozás esetén C a konstrukció, a felhasznált anyagok minőségének, kivezető lábak számának, valamint hermetikus tokozás esetén a lezárási szakasz hosszának a függvénye.

Az egyes áramköri elemek meghibásodási rátája a hőmérséklet (T), a villamos igénybevétel (U) és a választott meghibásodási kritérium (M_k) függvénye: $\lambda_t = f(T, U, M_k)$. Tekintettel azonban arra, hogy a tényleges üzemelés során — az áramkörön belül — még az egyazon típusú elemeket (alkatrészeket) sem azonos igénybevétel éri; továbbá, hogy az egyes elemek stabilitásával szemben támasztott követelmények — meghibásodási kritériumok —, pozícióként változóak; λ_A pontos becslése tetemes számítás ráfordítást igényel még akkor is, ha az egyes elemek meghibásodási rátái és azok igénybevételétől való függése ismert. λ_A informatív jellegű becsléséhez azonban elegendő a számításokat átlagos elem-meghibásodási ráta értékekkel ($\bar{\lambda}_i$) elvégezni.

Konvencionális villamos igénybevétel- és meghibásodási kritérium alkalmazása esetén a meghibásodási ráta hőmérséklet függőségére az 1. és 2. ábra szol-

gáltat információt [3]. Az ábrák jellegzetes szigetelő alapú integrált áramköri elemek átlagos meghibásodási ráta értékeit demonstrálják, Arrhenius-papírra rajzolt $\ln(1/T)$ gyorsítási egyenesek formájában. Az egyes görbék meredekségét az elemekben fellépő termikusan aktivált romlási folyamat aktiválási energiájának értéke határozza meg.

McCormic által közzétett — a légierőnél megfigyelt — adatok szerint [3] félvezető morzsa face-up beültetése alkalmával, amikor is a morzsanak a hordozóhoz való rögzítése ragasztással, vagy eutektikus forrasztással történik, kivezetőként aranyhuzalt használva: egy bondolási pont várható λ -faktora, termokompressziós bondolást alkalmazva 6×10^{-10} /óra; ultrahangos bondolásnál 3×10^{-10} /óra. Face-down beültetésre alkalmas eszközöknél: flip-chip, valamint beam-lead kivétel esetén, a chip és a kivezető közötti pontok meghibásodási rátája 1×10^{-10} /óra, illetve 1×10^{-11} /óra. A λ -faktor hőmérséklettől való függését az 1. és 2. ábra jól érzékelteti. Az áramköri elemek működése közbeni hőmérsékletének meghatározása vagy kísérleti úton [4, 5], vagy számítógépes hőanalízis segítségével történhet [6].

2. Az összetevő λ -faktorok meghatározására szolgáló modell áramkörök főbb jellemzői

A kész — megrendelői igény szerint mintázott — szigetelő alapú integrált áramkörök élettartam vizsgálata alkalmával közvetlenül csak λ_A meghatározása lehetséges, azaz csak a rendszer be- és kimeneti paraméterváltozásai kísérhetők figyelemmel. Ilyen vizsgálatok alkalmával a megbízhatósági modellben előforduló összetevő λ -faktorokra csak korlátozott információ nyerhető. Ezen nehézség következtében a (3) ... (7) összefüggésekben szereplő összetevő λ -faktorok meghatározása csak kimondottan a vizsgálatok céljaira tervezett modell áramkörök megbízhatósági vizsgálatával valósítható meg.

A modell áramkörök azonban nem kizárólagosan a λ -faktor meghatározására szolgáló megbízhatósági vizsgálatok eszközei. Alkalmazásukkal egyéb megbízhatósági mutatók meghatározása is lehetséges. Így például az áramkörök tervezése során végzendő tűrésanalízis olyan jellegű adatszolgáltatást is megkövetel, amely arra nyújt információt, hogy az egyes áramköri elemek villamos jellemzői milyen mérvű változást fognak mutatni különböző időpontokban, különböző üzemeltetési feltételek mellett (stabilitási adatok). A modell áramkörök a vizsgálni kívánt elemek nagyobb számú csoportját tartalmazzák és az alábbi sajátos tulajdonságokkal jellemezhetők:

- minden vizsgálni kívánt alkatrész, vagy áramköri elem külön kivezetéssel rendelkezik, így azok szeparált vizsgálata lehetséges;
- a modell áramkör előállításakor ugyanolyan behatások érik az áramkörbe beépített alkatrészeket és áramköri elemeket, mint a tényleges gyártás során;
- a beültetett alkatrész mechanikai- és klíma behatásokkal szembeni ellenállóképessége, közvetve a beültetés és védelem hatékonysága, ellenőrizhető.

A modell áramkörök jellegzetes képviselői:

- a szimulációs áramkörök;
- és a tesztábrák.

2.1. Szimulációs áramkörök

Szimulációs áramkörök alkalmazására elsősorban λ_{Alk} meghatározása alkalmával kerül sor. Segítségükkel az alkatrészek beültetésekor fellépő és a várható felhasználás során kialakuló körülményeket, illetve behatásokat szimuláljuk.

2.2. Tesztábrák

A tesztábrák $\lambda_{Hé}$ és a hordozón kialakított áramköri elemek meghibásodási rátájának: λ_R , λ_C , λ_K stb. meghatározására szolgálnak. Jellemzőjük, hogy topológiájuk kialakítása kimondottan a konkrét vizsgálati szempontok figyelembevételével történik.

3. A megbízhatósági vizsgálatok jellege

A megbízhatósági vizsgálatok, jellegüket tekintve az alábbi két kategóriába sorolhatók:

- meghatározó vizsgálatok,
- ellenőrző vizsgálatok.

A meghatározó jellegű vizsgálatok tipikus képviselői azok a modell áramkörök segítségével végzett vizsgálatok, amelyek — az alaptechnológia kidolgozása alkalmával — a technológiai paraméterek optimumra történő beállítását célozzák. Ilyenkor a technológiai változók szeparációs módszerét alkalmazva: a vizsgálatban részt vevő mintacsoportok valamely technológiai paraméter különböző beállításai mellett készülnek. Az egyes minta csoportok megbízhatósági tulajdonságainak meghatározása után, pozitív szelekció segítségével választható ki a megbízhatósági szempontból is optimális eredményt nyújtó technológia vagy tesztábrák készítés → vizsgálat → szelekció → újbóli tesztábrák készítés, ciklikus ismétlésével — lényegében iteráció segítségével — alakítható ki az optimális eredményt nyújtó technológiai eljárás.

Az ellenőrző vizsgálatok célja: a gyártási stabilitás ellenőrzése. A megbízhatósági vizsgálatok időszakos megismétlésével a gyártás stabilitására nyerhetők információk. Ha az időszakos ellenőrző vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a megbízhatósági mutatók az előírt szintet nem érik el, úgy a hiányosságok kiküszöbölésére irányuló intézkedések megtételére kerül sor.

4. Kísérleti rész

Mint az előbbi fejezetekből is látható, modell áramkörök megmintázásának szükségessége számos oldalról merülhet fel, a legkülönbözőbb követelményeket támasztva a megmintázással szemben. Valamennyi lehetséges változat áttekintése dolgozatunk kereteit túllépné, ezért ismertetésünket — egyes — a HIKI technológiai részlegéi által készített modell áramkörök és a segítségükkel végzett megbízhatósági vizsgálatok ismertetésére korlátozzuk.

4.1 Monolit kerámia chip-kondenzátorok vizsgálata

A vizsgálati terv összeállítása annak figyelembevételével történt, hogy a vizsgálatok eredményeitől választ vártunk arra vonatkozóan, hogy milyen paramétermutatók lépnek fel:

- a) a chip-kondenzátornak az áramkörbe történő beforrasztása, majd ezt követően tokozása alkalmával;
- b) akkor, ha a már tokozott kondenzátorokat különböző igénybevételek érik;
- c) továbbá, ha a hőkezelt, de nem tokozott kondenzátorok tárolása normál feltételek mellett történik.

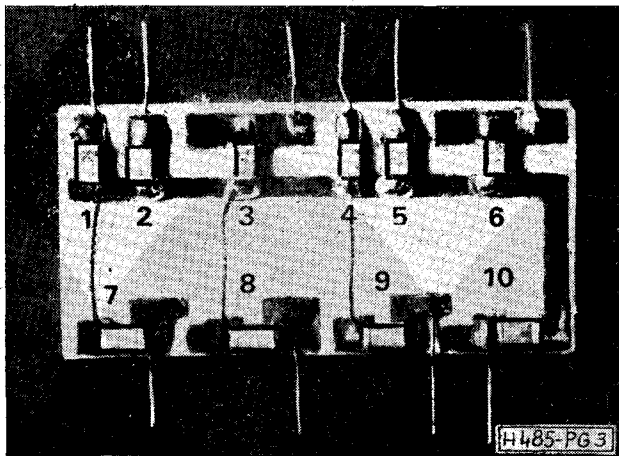
A vizsgálat során használt szimulációs áramkört a 3. ábra szemlélteti, tokozás előtti állapotban. Az áramkör 10 db kondenzátor egyidejű vizsgálatát biztosítja. Az adott esetben, a termékletap előírása szerinti +125 °C-on történő hőkezeltetés után, a minták egy részét tokoztuk. A tokozatlan mintákon tartós tárolás vizsgálatot végeztünk normál feltételek ($T_v = +25$ °C, normál légnedvesség) mellett. A tokozott mintákat három csoportra osztva, azokat a vázlat szerinti élettartam vizsgálatoknak vetettük alá (4. ábra).

Impulzus igénybevétellel történő élettartam vizsgálat beiktatását az indokolta, hogy a kondenzátorok, felhasználásuk során elsősorban impulzus igénybevételek lesznek kitéve.

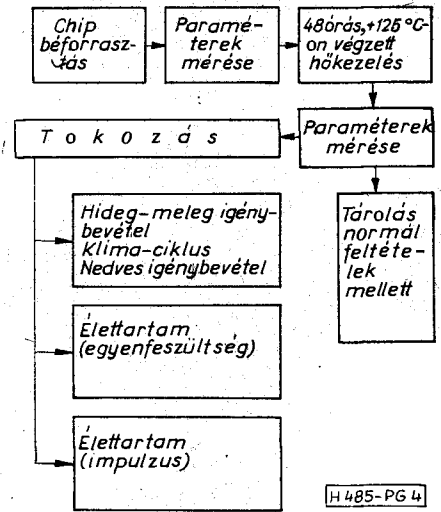
4.2 Ellenállás tesztábrák vizsgálatai

Mint ismeretes, vastagréteg ellenállások ellenállás értékének időbeli változását — közvetve — hőmérsékleti és villamos behatások váltják ki (a nedvesség behatásától most eltekintünk). Az ellenállásérték maradandó változását kiváltó főbb folyamatokat az 5. ábra foglalja össze, feltüntetve, hogy villamos igénybevétel alkalmával az ellenállásban disszipált teljesítmény járulékos hő-igénybevétel formájában jelentkezik.

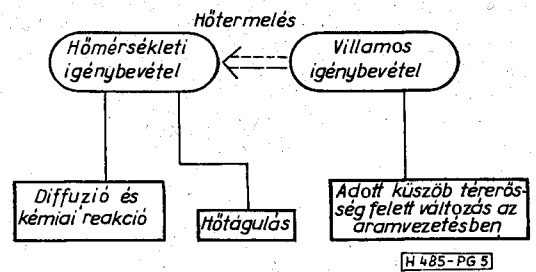
A tesztábrák és a megbízhatósági vizsgálatok tervezése alkalmával abból indultunk ki, hogy a stabilitást elsősorban az 1. táblázat szerinti tényezők befolyásolják.



3. ábra. Szimulációs áramkör kerámia chip kondenzátorok vizsgálatához



4. ábra. A vizsgálat folyamatábrája



5. ábra. Maradandó ellenállásváltozást kiváltó folyamatok

1. táblázat

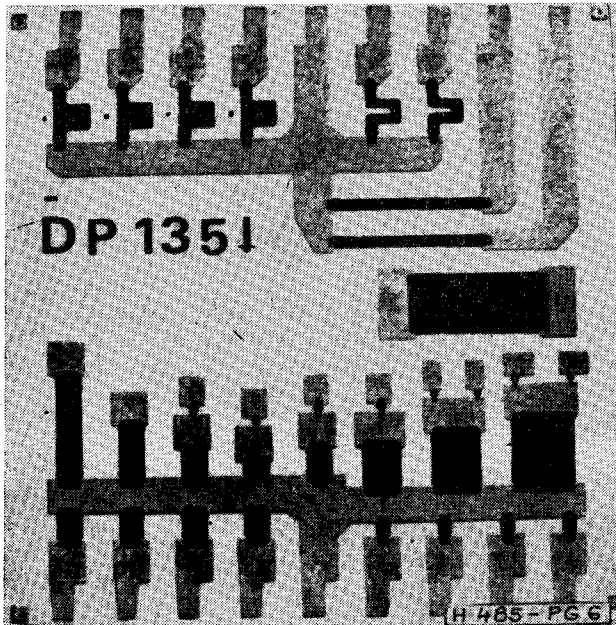
A stabilitást befolyásoló főbb tényezők

Alapanyagok fizikai — kémiai tulajdonságai	Technológiai paraméterek	Tervezéstől függő tényezők
Ellenállás paszta Vezető paszta	Felnyomtatás Beégetés	Konstrukció Geometriai méret
Hordozó Burkoló (tokozó) anyag	Lehűtés Értékbeállítás Tokozás	

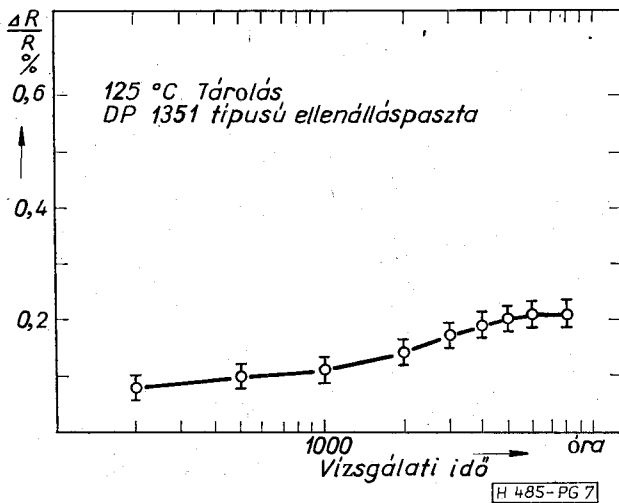
4.2.1 Stabilitás vizsgálat gyári tesztábrával

Tipikusan vastagréteg ellenállások élettartam vizsgálatához készülnek azok a tesztábrák, amelyeket a pasztagyártó cégek hoznak forgalomba. Ellenállás és vezető paszták felvitelével készített vizsgálóábrákat a felhasználók rendelkezésére bocsátják, hogy azokat bevizsgálhassák. Ezek a tesztábrák szigorúan ellenőrzött, ideális gyártási körülmények között készülnek, így tulajdonképpen a szóbanforgó pasztákkal elérhető legkedvezőbb eredményeket reprezentálják.

A Du Pont cég, DP 1351 típusú ellenálláspaszta felvitelével készült tesztábráját (6. ábra), +125 °C hőmérsékletű vizsgálókamrában tárolás vizsgálatnak vetettük alá (vizsgált áramkörök száma: 20 db). A tesztábrákat burkolat nélküli állapotban vizsgáltuk. 8000 óra után a 7. ábra szerinti min. — átl. —



6. ábra. A Du Pont cég vastagréteg tesztábrája



7. ábra. A 6. ábra szerinti tesztábra ellenállásainak átlagos ellenállásváltozása a vizsgálati idő függvényében

max. relatív ellenállás változást észleltük az $1,5 \times 1,5$ mm-nél nagyobb ellenállások esetében. Az ennél kisebb méretű ellenállások stabilitása — a vezető- és ellenállásréteg átfedési tartományának viszonylagos megnövekedése következtében — kedvezőtlenebbnek adódott.

4.2.2 Stabilitás vizsgálat saját tesztábrával

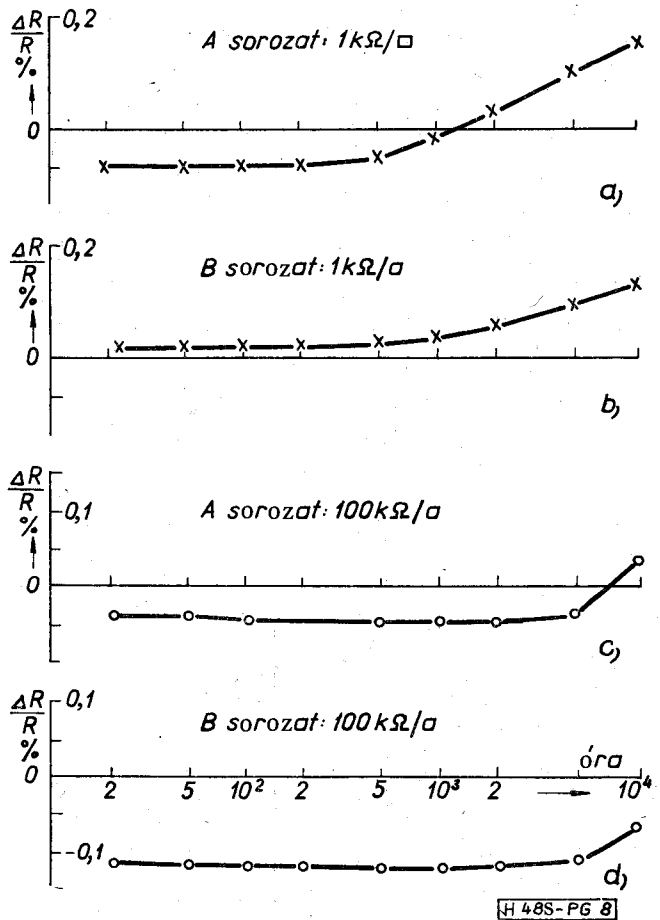
A gyári tesztábrákon kívül feltétlenül szükséges a saját technológiával előállított tesztábrák vizsgálata is, mert a vastagréteg ellenállások megbízhatósági mutatóit az alkalmazott technológiai műveletek, az előállításához használt gépi berendezések, a kerámia hordozó, a védelem céljára szolgáló tokozás, valamint az egyes áramkört elemek közötti összeköttetést biztosító vezetőréteg fizikai-kémiai tulajdonságai együttesen befolyásolják (ld. 1. táblázatot).

Ezen vizsgálatok eredményei választ adnak arra, hogy egy adott paszta-sorozat alkalmazásával milyen

stabilitású ellenállásokra lehet majd számítani, az áramkörök gyártása során. Mint ismeretes, a paszta-sorozatok egyes tagjai azonos alapanyagok felhasználásával készülnek, azonban üveg-, illetve vezető komponenseik aránya eltérő, így különböző ohm/□ (négyzetes ellenállású) rétegek előállítását teszik lehetővé. Rendszerint az egy paszta-sorozatba tartozó, egymást követő paszták fajlagos ellenállása egy nagyságrenddel változik. A vizsgálatok céljaira a paszta-sorozat valamennyi tagjának felhasználásával szükséges vizsgálóábrát készíteni, mert az eltérő üveg/vezető arány következtében a rétegek stabilitási tulajdonságai nem azonosak. Különböző paszták felhasználásával készült rétegek értékstabilitási tulajdonságainak eltérő jellegét a 8. ábrán látható görbék jól érzékeltetik. A bemutatott görbéket két — egyaránt $Bi_2Ru_2O_7$ alapú — paszta-sorozat (az ábrán A és B jelűek), összehasonlító jellegű vizsgálata alkalmával nyertük: amikor is +70 °C környezeti hőmérséklet mellett, egyenfeszültségű villamos igénybevételt alkalmazva, a $4,6 \times 2,2$ mm méretű, szalag alakú ellenállások átlagos réteghőmérséklete +95...+100 °C értékű volt.

A 8. ábra mindkét paszta-sorozat 1 kohm-, illetve 100 kohm négyzetes ellenállású pasztáinak felhasználásával készült ellenállások átlagos ellenállásváltozását tünteti fel a vizsgálati idő függvényében.

Arra vonatkozóan, hogy az egyaránt $Bi_2Ru_2O_7$ alapanyagú A és B paszták összetétele milyen vonatkozásban tér el egymástól, nem rendelkezünk adatokkal,



8. ábra. A- és B- jelű pasztasorozatok vizsgálati eredményei. Átlagos változások: a és c 1 kohm/□; b és d 100 kohm/□

mivel a gyártó ezeket az adatokat bizalmasan kezeli. Az azonban ismert, hogy a $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ alapanyagú paszták összetevőik szerint az alábbi két fő osztályba sorolhatóak:

I. $|\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7| + |\text{Üveg}|$

II. $|\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7| + |\text{Adalék}| + |\text{Üveg}|$

A vizsgált paszták feltehetően a II. osztályba tartoznak, így eltérés az A és B sorozat tagjai között akár az adalék, akár az üveg komponens tekintetében lehetséges. Bármelyik komponens változtatása a réteg villamos és stabilitási tulajdonságainak a megváltozását vonja maga után.

A 7. és 8. ábrák diagramjait összehasonlítva szembevetünk, hogy függetlenül attól, hogy a vizsgálat alatt hő + villamos igénybevételt alkalmaztunk (8. ábra), vagy csupán hőmérsékleti hatásnak tettük ki az ellenállásokat (7. ábra), az ellenállásváltozás sebessége ($\Delta R/\Delta t$) a vizsgálat kezdeti 100 . . . 200 óráig terjedő szakaszában volt a legjelentősebb. Tapasztalataink szerint a fenti jelenség hő + villamos igénybevétellel, de úgyszintén „tisztán” hőmérséklet igénybevétellel végzett élettartam vizsgálatok alkalmával kisebb vagy nagyobb mértékben a minták számottevő hányadánál észlelhető. A jelenség burkolatlan és már védő burkolattal ellátott mintáknál egyaránt megfigyelhető.

Általában: az eddig rendelkezésünkre álló vizsgálati eredményeink azt mutatják, hogy vastagréteg ellenállások esetén az ellenállásváltozás az alábbi összefüggés segítségével adható meg:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\text{össz}} = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\text{kezdeti szakasz}} + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\text{átmeneti szakasz}} + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\text{további szakasz}} \quad (8)$$

A 7. és 8. ábrák eredményei alapján az egyes szakaszok a 2. táblázat szerint jellemezhetők.

2. táblázat

Az egyes szakaszok jellemzése

Megnevezés	Szakasz megnevezése		
	Kezdeti	Átmeneti	További
Változás mértéke	gyors	mérsékelt	mérsékelt
Változás jellege	+ 0 -	+ 0 -	+
Előtrébe kerülő folyamatok	Hőtágulás ←————→ Diffúzió és kémiai reakciók ←————→		
Körülbelüli időtartam (óra)	0...200	200...500	5000 felett

Megjegyzés: gyakorlati szempontból nullának tekintjük a változást akkor, ha kisebb mint ±0,05%.

Arra a kérdésre választ keresve, hogy a kezdeti szakaszban fellépő változást milyen mechanizmus váltja ki, figyelembe kell venni, hogy Taketa [7] kísérletei szerint a $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ alapanyagú paszták (az általunk is használt és vizsgált típus) megemelt hőmérséklet mellett, oxigén közegben végzett tárolási vizsgálata alkalmával ugyanolyan mérvű és jellegű ellenállás változás következik be, mint amikor a környezeti közeg levegő vagy argon. A hivatkozott publikáció szerint az oxigén közegben vizsgált réteg oxigén-koncentrációjának emelkedését az elektron-mikroszondás röntgen (EMX) analízis eredményei nem mutatták, több ezer órás igénybevétel után sem. Így megállapítható, hogy a kezdeti szakaszban fellépő változást döntő mértékben nem oxidációs folyamatok váltják ki.

Feltételezhető, hogy $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ alapú ellenállások esetében a kezdeti szakaszban fellépő változás elsősorban a réteg és a hordozó közötti mechanikai erőknél, illetve elmozdulásoknak tudható be. Nem zárható ki, hogy az igénybevétel kezdeti időszakában mutatkozó viszonylagos nagyobb mérvű változás elsősorban a beégetést követő lehűtés után visszamaradt mechanikai feszültségek feloldódásának a következménye. Természetesen ez azt is jelenti, hogy a villamos igénybevétel elsődlegesen nem közvetlenül, hanem csak közvetve, hő hatásán keresztül érvényesül. Ezen utóbbi megállapítást azonban ki kell egészíteni azzal, hogy ez csak akkor igaz, ha a rétegben uralkodó térerősség egy adott küszöb-térerősséget nem halad meg (ld. 4.2.4 pontot).

A (8) összefüggés jobb oldalán álló második tag az átmeneti szakaszban bekövetkező változást reprezentálja. Ez a szakasz „átmenetinek” tekinthető, mivel az ilyenkor észlelt változás már nem egyértelműen a hőtágulás által kiváltott mechanizmusok által jön létre, hanem egyéb folyamatok, úgymint diffúziós és kémiai reakciók is szerephez jutnak. Az átmeneti szakasz után a vizsgálat további szakaszában — kb. 10^4 óra után — tendenciózus ellenállásnövekedés lépett fel. Az ebben a szakaszban megfigyelhető ellenállásváltozás hőmérséklettől való függése az Arrhenius-féle összefüggés segítségével adható meg az alábbi alakban:

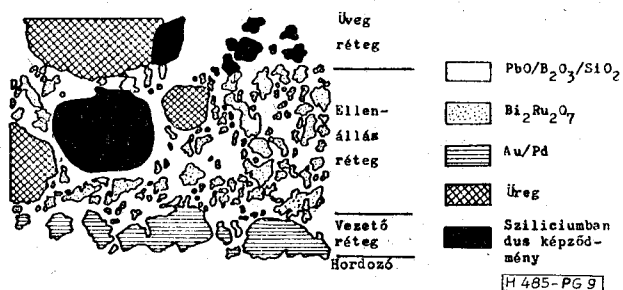
$$\lambda(T) = C_0 \exp[-qV_a/kT],$$

ahol:

- T — a réteg hőmérséklete °K-ben;
- q — az elemi töltés ($1,6 \cdot 10^{-19}$ As);
- k — a Boltzmann-állandó ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Ws/°K);
- V_a — a termikusan aktivált romlási folyamat aktiválási potenciálja [V];
- C_0 — a réteg alapminőségére jellemző állandó.

A vastagréteg ellenállások áramvezetési mechanizmusa még nem tisztázott, de hasonlóan nem ismertek részleteiben az ellenállás változást létrehozó jelenségek sem. Ennek egyik fő oka, hogy a réteg szerkezete heterogén.

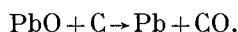
A 9. ábra egy jellegzetes $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ alapú pasztarendszer felhasználásával készült ellenállás rétegszerkezeti vázlatát mutatja, amely pásztázó elektron-mikroszkópos és elektron-mikroszondás vizsgálatok eredményei alapján készült [9]. A metszet az ellen-



9. ábra. Rétegszerkezet (az ábra nem méretarányos)

állás azon részét mutatja, ahol az ellenállásréteg az előzetesen már felnyomtatott és beégetett — vezetőpaszta felhasználásával készült — vezetőréteggel érintkezik, azaz azt fedi. Így az ábra alsó részében látható Au-Pd zónák a vezetőréteg alkotói. Az ellenállás felső része járulékos üveg védő-réteggel is be volt vonva, amelyet üveg tartalmú paszta utólagos felnyomtatásával és beégetésével hoztak létre azért, hogy az ellenállásokat a külső behatásokkal szemben védjék. Megemlítjük, hogy a 9. ábra tudatosan olyan ellenállás rétegszerkezetet mutat, amely — technológiai hiányosságok következtében — a megengedettnél nagyobb mértékben tartalmaz szilícium zárványokat és üregeket. Az üregek keletkezése a nem kielégítően végzett beégetéssel hozható kapcsolatba. Ha ugyanis a felfűtés kezdeti sebessége gyors, akkor a szerves kötőanyagokból és oldószerekből felszabadult gázok nem tudnak kellő mértékben eltávozni a rétegből, hanem visszamaradva üregeket képeznek.

Helytelenül végzett beégetés alkalmával a kötőanyagok elszénesezése miatt CO-zárványok képződése is bekövetkezhet az alábbi reakció szerint:



A szilíciumban dús zárványok létrejötte pedig a paszta elégtelen elkeverésével magyarázható. Ideális gyártás esetén az üregek és szilícium zárványok kialakulása nem törvényszerű.

4.2.3 Az értékbeállítás befolyásának vizsgálata

Az értékbeállítási (trimmelési) művelet a vastagréteg ellenállások stabilitását csökkentheti, aminek főbb okai:

- homokfúvatással végzett koptatásos eljárás esetén a koptatni nem kívánt felületre elkerülhetetlenül becsapódó homokszemcsék rétegroncsoló hatása;
- lézersugaras eljárásnál a nem kellően megválasztott energia, illetve impulzus ismétlődési frekvencia következtében adódó nem tökéletes rétegtávoltítás [8];
- mindkét trimmelési eljárás esetén a vezetésben részt vevő réteg elszűkülése következtében fellépő túlmelegedés.

Az utóbbi önmagában is az ellenállásérték bizonyos határon túli növelésének egyik korlátozó tényezője.

Lézer sugárral trimmelt ellenállások:

Az intézeti lézersugaras berendezéssel (YAG lézer) trimmelt ellenállások stabilitásának meghatározására a 10. ábra szerinti tesztábrát alkalmazzuk. A tesztábr

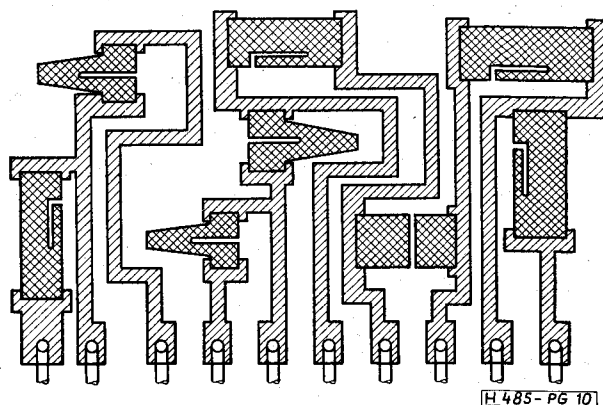
ra az ellenállásjaj és nonlinearitás szempontjából kedvezőbb, ún. kalap-alakú ellenállások vizsgálatát teszi lehetővé. A tesztábrára szalag alakú ellenállást a vájat teljesen ketté szeli, így ezen „ellenállás” két ki-vezetése között mérhető szigetelési ellenállás alapján a rétegtávoltítás hatásosságára lehet következtetni.

Homoksugárral trimmelt ellenállások:

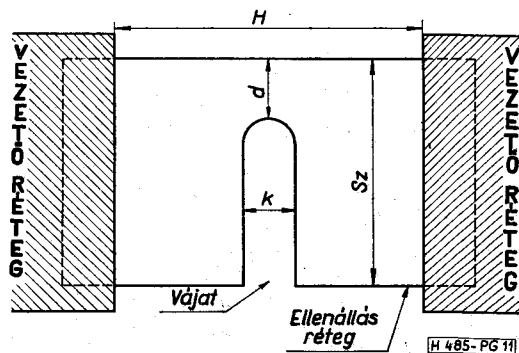
Egy kísérletsorozat alkalmával, az intézetben kifejlesztett és gyártott CG—040 típusú homoksugaras trimmelő berendezéssel trimmelt, tesztábrákat vizsgáltuk. A vizsgálat során állandó értéken tartott, $k=0,4$ mm-es kivágási szélesség mellett, különböző mérvű elszűkítés (ld. 11. ábrán d -vel jelölve) — vagy ami ennek következménye, érték növelés — esetén adódó stabilitási jellemzőket határoztuk meg élet-tartam vizsgálatok segítségével.

Ezen komplex kísérletsorozat eredményei közül az alábbiakban annak ismertetésére térünk ki, amelyet extrém mértékben trimmelt ellenállások vizsgálata során nyertünk, ugyanis ezek az eredmények a vastagréteg ellenállások túlterhelés iránti nagyfokú ellenállóképességét meggyőzően érzékeltetik.

A vizsgálathoz használt tesztábrák ellenállásai DP 1131 ellenálláspaszta felnyomtatásával készültek ($6 \times 1,5$ mm), majd homokfúvatásos trimmeléssel ($k=0,4$ mm) kereszt irányban $d=0,2$ mm-re szűkítették azokat. A nagymérvű elszűkítés kb. 3,3-szoros ellenállásérték növekedést eredményezett. A vizsgálat körülményei: a vizsgált ellenállások száma $N_0=100$ db; $T_v=+100$ °C; $P_v=0,1$ W. A szűkületi pontban kialakult áramsűrűség: $0,66$ A/mm². A disz-



10. ábra. A lézersugaras trimmelés jellemzőinek meghatározásához használt tesztábra



11. ábra. Homoksugárral trimmelt ellenállás (az ábra nem méretarányos)

szipált hő 2/3-ad része az elszűkített pontban $0,2 \times 0,4 \text{ mm}^2$ felületre koncentrálódott, ami igen nagy, közelítőleg $0,8 \text{ W/mm}^2$ felületi rétegterhelést jelentett.

A nagyfokú rétegtúlterhelés ellenére teljes meghibásodás — ún. „szakadásos” meghibásodás — a 6000 órás vizsgálat folyamán egyetlen esetben sem következett be! Ha a részleges meghibásodás kritériumaként különböző határértékeket választottunk, úgy a 100, illetve 6000 órás mérési időpontokban a 3. táblázat szerinti előfordulási gyakoriságot figyelhettük meg. A táblázatban a meghibásodási kritérium negatív előjelű, mivel egyöntetűen ellenálláscsökkenés következett be.

A vastagréteg ellenállások nagyfokú túlterhelés-állósága elsősorban az alkalmazott üveg/fém réteg magas olvadáspontjának és a réteg viszonylagos vastagságának ($15 \dots 30 \mu\text{m}$) tulajdonítható. De nem hagyható figyelmen kívül az sem, hogy a szokásos 96%-os Al_2O_3 kerámia hordozók hővezetési tényezője igen kedvező ($0,06 \text{ cal/cm s } ^\circ\text{C}$). Ezen túlmenően egy tipikus vastagréteg sajátosság is hozzájárul, nevezetesen az, hogy a vastagréteg ellenállásoknál a vezető- és ellenállásréteg közötti átmenet folyamatos. Bizonyítja ezt, hogy a vastagréteg ellenállások felületi potenciáeloszlását mérve, vezetőrétegtől-vezetőréteggig haladva, jó közelítéssel lineáris változás adódik. Ebből a szempontból legkedvezőbb a helyzet akkor, ha az ellenállások ún. post-fired eljárással készültek, amikor is előbb az ellenállásréteget viszik fel és égetik be (pl. $820 \text{ } ^\circ\text{C}$), majd ezt követően történik az alacsonyabb beégetési hőmérsékletet (pl. $720 \text{ } ^\circ\text{C}$) igénylő vezetőréteg felvitele és beégetése [10].

4.2.4 Küszöb-térorósség meghatározása

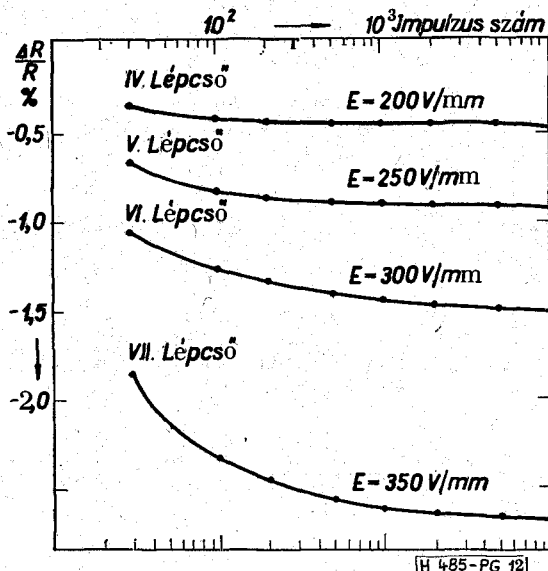
A fénoxid-üveg keverék ellenálláspaszták felnyomatásával készült ellenállások ismert tulajdonsága, hogy az egyes pasztatípusokra jellemző küszöb térorósséget (E_k) túllépve, maradandó ellenállásváltozás következik be.

Egy, a fenti jelenséget leíró modell Olivei-től [11] származik. A modell lényege az, hogy az áramvezetés alacsony térorósség esetén a rétegben kezdettől fogva található vezetősatornákon keresztül történik. Ha azonban a térorósség egy bizonyos határértéket túllép, akkor újabb csatornák kialakulása, illetve a meglévők egy részének megszűnése következik be. A modell az újonnan kialakuló, illetve megszűnő csatornák számát és egyéb jellemzőit, valamint a fellépő ellenállás-

3. táblázat

Extrém mértékben trimmelt vastagréteg ellenállások részleges meghibásodása

Hiba kritérium $\Delta R/R\%$ nagyobb mint	A hiba kritériumot túllépő példányok százalékos aránya a tételben belül	
	100 óránál	6000 óránál
-0,5%	57%	100%
-1,0%	24%	100%
-2,0%	+	51%
-3,0%	—	6%
-4,0%	—	3%
-5,0%	—	—



12. ábra. Impulzus igénybevétel hatására bekövetkezett ellenállásváltozás

változás mértékét matematikai-statisztikai módszerekkel közelíti.

A küszöb térorósség meghatározására szolgáló vizsgálatokat lépcsős (step-stress) igénybevétellel — impulzus üzemmódban — végezzük. Az impulzus üzemmód alkalmazására az ellenállások tartós felmelegedésének elkerülése miatt kerül sor. Az 1 Hz ismétlődési frekvenciájú impulzusokat tirisztoros impulzus generátor állítja elő.

Az ellenállásrétegben uralkodó E térorósséget $E = 50 \text{ V/mm}$ -ről indulva (I. lépcső), minden 10^4 impulzus után 50 V/mm -re emeljük.

A vizsgálatokhoz olyan tesztábrák készültek, amelyek elrendezése biztosította, hogy a szomszédos rétegek között átütés nem jöhetett létre.

A hazai gyártású áramkörökben gyakran alkalmazott DP 1131 típusú $1 \text{ kohm}/\square$ ellenállású pasztával készült, $2,0 \times 1,1 \text{ mm}$ méretű, szalag alakú ellenállások szignifikáns ellenállás változása a IV. igénybevételi lépcsőben ($E = 200 \text{ V/mm}$) következett be. Az azt megelőző III. lépcső ($E = 150 \text{ V/mm}$) után egyértelmű változás még nem volt észlelhető, így: $150 \text{ V/mm} < E_k < 200 \text{ V/mm}$. A továbbiakban még három igénybevételi lépcsőt alkalmaztunk (V...VII. lépcsők). A IV. és az ezt követő lépcsőkön belüli $\Delta R/R\%$ változást az impulzusszám függvényében a 12. ábra mutatja. Kísérleteink szerint a bekövetkező ellenállásváltozás mértékét és jellegét az impulzus jelalak és kitöltési tényező viszonylag tágabb határok között történő változtatása nem befolyásolja.

Megemlítjük, hogy a szóbanforgó DP 1131 típusú ellenálláspasztát a $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ rendszer egyik jellegzetes képviselője. Súlyszázalékban kifejezett összetétele [9]: Bi_2O_3 26%; RuO_2 14%; PbO 29%; SiO_2 13%; B_2O_3 10%; Al_2O_3 4%; CdO 0,1%.

Olyan különleges ellenálláspaszták is forgalomban vannak, amelyek küszöb-téroróssége a vizsgált típusénál lényegesen nagyobb, így segítségükkel kimondottan stabil, nagyfeszültségű ellenállások, illetve nagyfeszültségű osztók előállítására is lehetséges.

Következtetések

- A vastagréteg ellenállások stabilitási diagramjainak a megszerkesztése korántsem olyan egyszerű feladat, mint az a Ni—Cr rétegellenállások esetében tehető. Amíg a Ni—Cr ellenállásoknál — ideális gyártást feltételezve — az oxidáció az egyetlen számottevő ellenállásváltozást létrehozó folyamat, addig a vastagréteg ellenállások esetén megfigyelhető értékváltozás több, összetett folyamat eredőjeként jelentkezik.
- A $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ alapanyagú paszták felhasználásával készült trimmeletlen vastagréteg ellenállások kezdeti ellenállásváltozását a hőtágulás következtében fellépő mechanizmusok váltják ki, a villamos igénybevétel csak közvetve, hőhatásán keresztül, érvényesül.
- Amennyiben fokozott stabilitású ellenállásokra merül fel igény, úgy a (8) összefüggés szerinti kezdeti szakasz megemelt hőmérsékleten végzett, kb. 200 órás tárolással, vagy előégetéssel (burn-in) küszöbölhető ki.
- Az extrém mértékben elszűkített ellenállások vizsgálata során észlelt ellenállásváltozás minden esetben negatív előjelű volt. A 4.2.4 pontban ismertetett vizsgálat szeint az alkalmazott DP 1131 típusú ellenállás pasztával készített ellenállások küszöb térerőssége $\sim 150 \text{ V/mm}$, amelyet túllépve negatív előjelű értékváltozás következik be. Az extrém mértékben elszűkített ellenállások esetében a szűkülésben kialakult térerősség kb. 50 V/mm értékű volt, ami önmagában a negatív előjelű változást nem indokolja. Ez arra utal, hogy a trimmeléssel kialakított $0,2 \times 0,4 \text{ mm}$ -es réteg szakasz — extrém kis mérete miatt — anomális viselkedést mutat.
- Ugyancsak az extrém mértékben elszűkített ellenállások vizsgálata során kapott eredmények

az a vastagréteg ellenállások nagyfokú túlterhelésel szembeni ellenállóképességét eklatánsan bizonyítják. Felhasználó szempontból ez azt jelenti, hogy vastagréteg ellenállásokat feltétlenül célszerű azokban a berendezésekben alkalmazni, amelyeknél a katasztrófális jellegű meghibásodások fellépése nem megengedhető, így például biztosító berendezésekben, valamint a számítástechnika- és automatizálás területén.

I R O D A L O M

- [1] Remke, L. R.; Burdick, G. A.: Spiral inductors for hybrid and microwave applications. Proc. 24th Electronic Components Conf. 1974. p: 152-161.
- [2] Sato, K.; Harada, S.: A novel planar multilevel interconnection technology utilizing polyimide. Proc. 23rd Electronic Components Conf. 1973. p: 15-20.
- [3] Harper, Ch.: Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronics. Mc Graw—Hill, New York, 1975.
- [4] Bráda, F.; Petrikovits, L.: Felületi hőmérsékletmérés infravörös mikroszkóppal. A Híradástechnikai (Pari Kutató Intézet Jubileumi Évkönyve, Budapest, 1973. p: 305-317.
- [5] Rauche, M. L.; Randall, H. E.: Infrared as a thermal analysis tool. Solid State Technology, March 1970. p: 67-72; 87.
- [6] Martin, J. H.; Gunlov, V. T.; Burks, D. P.: Thermal analysis of ceramic-based microcircuits. Electronic Components, June 1970. p: 761-680.
- [7] Taketa, Y.; Haradome, M.: Stability and deterioration mechanism of thick film resistors. Microelectronics and Reliability, 13. k. 4. sz. 1974. p: 281.
- [8] Du Pont Electronic Materials (Katalógus kiadvány): Laser trimming techniques for thick film resistors.
- [9] Coleman, M. V.: Evaluation methods for the examination of thick film materials. IERE Conf. Hybrid Microel. 1973. p: 121.
- [10] Taketa, Y.; Haradome, M.: Thick film resistors with improved voltage stability. IEEE Trans of Parts, Hybrids and Packaging, PHP—10. 21. sz. 1974. p: 74-81.
- [11] Olivei, A.: On the sensitivity to high voltages of thick-film resistors. Proc. 23rd Electronic Components Conf. 1973. p: 140-152.