

Félvezető eszközök vizsgálata és hibaanalízise pásztázó (scanning) elektronmikroszkóppal

ETO 621.385.833.621.382.004.64

A modern félvezető eszközök egyre csökkenő mérete megkövetelte a mikroméretű eszközök gyártására és vizsgálatára alkalmas különleges berendezések és műszerek kifejlesztését. Napjainkban a pásztázó elektronmikroszkóp (az angolszász irodalomban Scanning Electron Microscope, röviden a SEM) az ipar széles területein kiszorítja a hagyományos optikai mikroszkópokat, de igazán sokoldalú és hatékony alkalmazására a félvezetőiparban került sor.

A pásztázó elektronsugaras eszközök működésére egyaránt jellemző a minta felületét folyamatos mozgással pásztázó elektronnyaláb. A nyaláb kölcsönhatásba lép a minta anyagával, ebből a kölcsönhatásból származó jelet detektáljuk, erősítjük, majd a kijelző katódsugárcső vezérlő elektródájára kapcsoljuk. A kijelző cső sugara szinkronban mozog a letapogató nyalábbal. Az eredmény: a detektált jel természetétől függő kép, amely a minta felületének egy adott tulajdonságát tükrözi. A kép nagyítása a letapogató terület és a kijelző cső ernyőjének méretarányától függ és széles határok között szabályozható.

Tekintettel arra, hogy a hazai irodalomban a pásztázó elektronmikroszkóp fő üzemmódjairól és alkalmazási területeiről átfogó tanulmányt olvashatunk [1], itt csak röviden felsoroljuk a félvezetőipar-kutatás szempontjából lényeges képalkotási módokat.

A pásztázó elektronnyaláb:

- a) mint „fény” feltárja a minta felületének domborzatát,
- b) mint „elektronnyaláb” a minta felületének feszültségeit érzékeli,
- c) mint „vezeték” töltéshordozókat juttat a kívánt pontba, így feltérképezhetők a minta felületéhez közeli p-n átmenetek,
- d) mint „energianyaláb” gyártási folyamatokban nyújt segítséget vagy mikrotérfigatok röntgenspektrális analizésére nyújt módot.

A fenti lehetőségek közül dolgozatunkban csak az a) pontnak megfelelő domborzati üzemmóddal foglalkozunk, vagyis a műszert ún. szekunder elektron üzemmódban használjuk.

Az eredményes félvezetőeszköz-gyártás elképzelhetetlen megfelelő hibaanalízis nélkül. A hibaanalízis

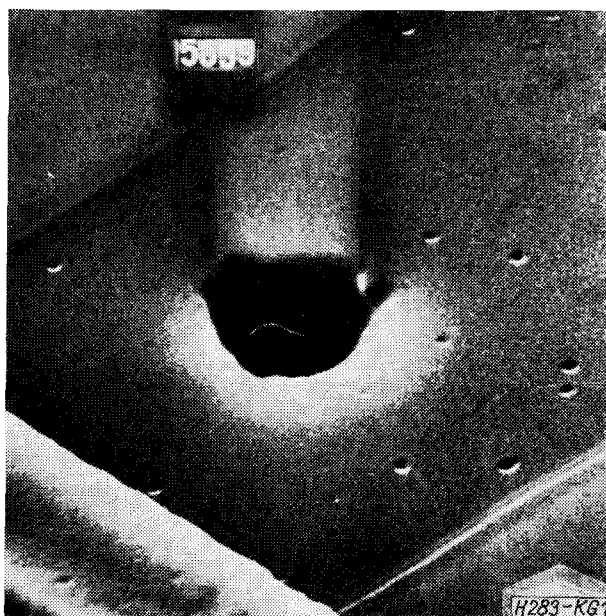
lehetséges útjai közül ebben a dolgozatban mi a legrégibb, de az emberi megfigyelés számára a legközvetlenebbet, a szemrevételezés útját jártuk, természetesen egy megfelelő „nagyító készülék” — a pásztázó elektronmikroszkóp — közbeiktatásával.

A hibás vagy annak tartott eszköztől kellően nagyított felvételeket készítettünk, majd a felvétel birtokában megállapításokat tettünk; vagy a megfigyelést egyéb (pl. elektronsugaras mikroanalizátoros vagy röntgendiffrakciós topográfias) vizsgálatokkal kiegészítve analizáltuk a hibát és az ezeket előidéző legvalószínűbb okokat.

A felvételek a Fémipari Kutató Intézet JEOL—JSM—U—3 típusú pásztázó elektronmikroszkópjával készültek, az EIVRT és FÉMKUT közötti szerződéses munka keretében. A közölt felvételek nagyítása 10×10 cm-es képméretre vonatkozik.

Jellegzetes meghibásodások

Dolgozatunk a hibaanalízissel foglalkozó előző munkához kapcsolódik [2], célja az ott bemutatott hibamechanizmusok illusztrálása hazai és külföldi selejtes példányokon.



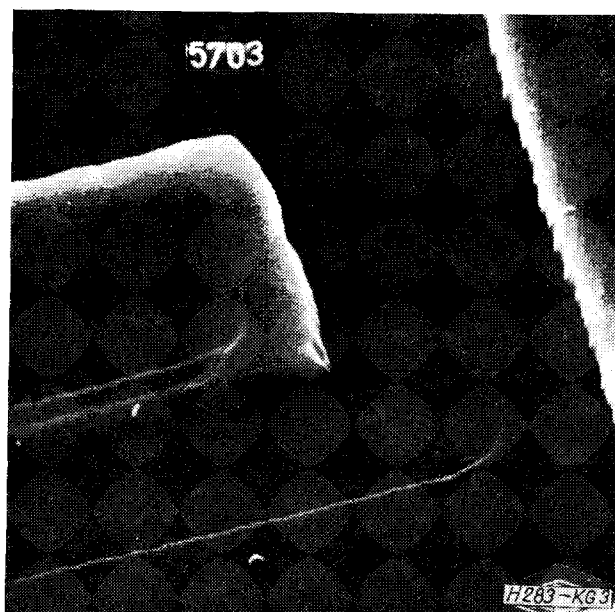
1. ábra. Integrált áramköri szeletrészlet oxidhibákkal (PEM 3000×)



2. ábra. Röntgendiffrakciós-topográfiai felvétel egy tranzisztorszeletről. Si {511} reflexió, Cu K_α sugárzás

Oxidhibák

Az 1. ábrán Si planár eszközre került porszemcse okozta hiba és az alakkristály hibahelyeiből származó pontszerű oxidhibák láthatók. A porszemcse okozta oxidlyuk kritikussá válhat, mivel a diffúzió folyamán hamis átmenetet okoz. A 2. ábra egy

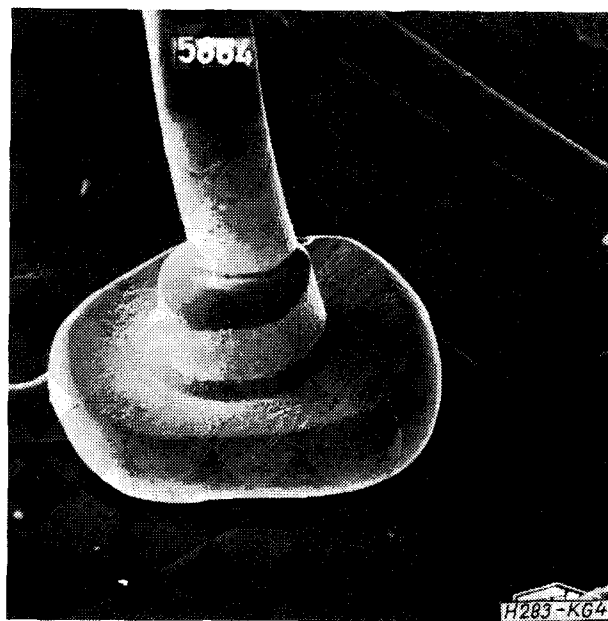


3. ábra. Passzívált felületű integrált áramköri részlet (PEM 3000 ×)

hasonló hibákat tartalmazó eszközről, az emitter-diffúzió után készült röntgendiffrakciós-topográfiai felvételt mutat. Az 1. ábrán látható oxidlyukassági hibák itt is megfigyelhetők (hamis diffúziós túlyukak). A kontrasztot itt a szeletet mechanikailag feszítő oxidréteg feszültséggradiense okozza, mely a lyuk környezetében lép fel és deformálja a reflektáló síkokat [3]. A felvételen ezenkívül egy átlós irányú karcolás, ill. az onnan kilépő diszlokációk is láthatók. Az alakristály hibáinak átnövéséből származó hibahelyeket a felületi passzivációs védőréteg — amit a tömeggyártási termékeinken alkalmazunk — „elkeni”, kevésbé éles kontúrokkal rajzolja ki. A 3. ábra egy TUNGSRAM gyártmányú, passzívált felületű integrált áramkör egy részletéről készült. Jól érzékelhető a fémezés éles, egyenletes határfelülete, mely jóminőségű fotorezisztre és hibátlan gyártástechnológiára utal.

Kötési hibák

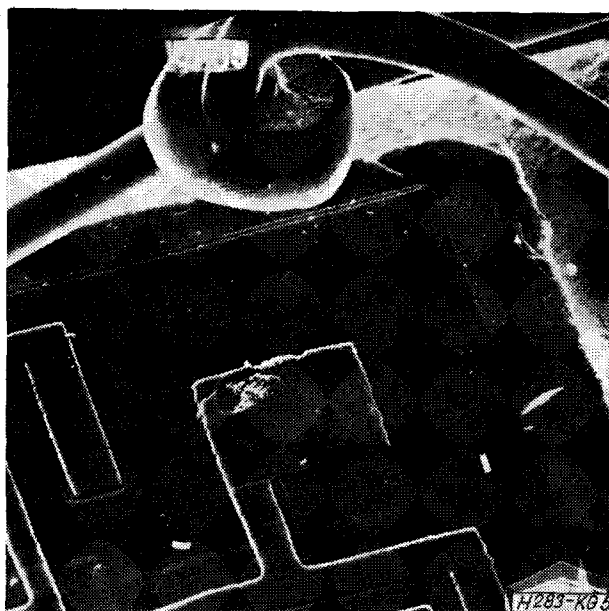
Tekintettel arra, hogy a planár technológia az elemek felületi és térfogati hibáit az előző technológiákhoz képest a minimálisra csökkentette, a megbízhatóság kérdésköre javarészt az elektromos kötések megbízhatóságára szűkül.



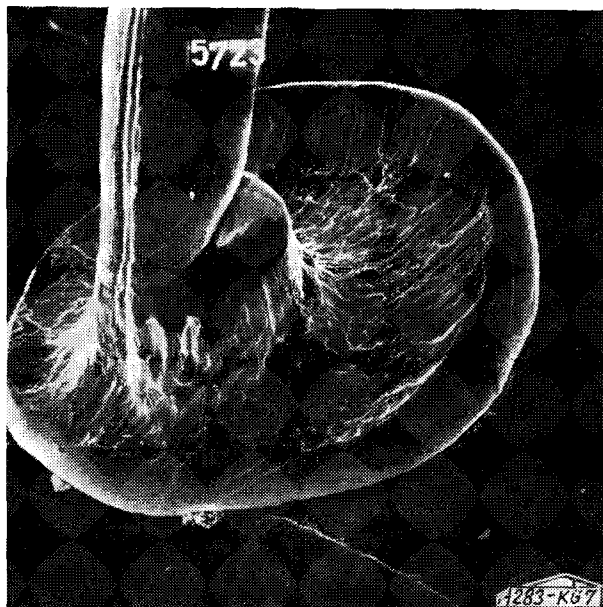
4. ábra. Jó minőségű termokompressziós kötés (PEM 600 ×)

Továbbiakban az Au-Al, termokompressziós kötési technológiával készített eszközök hibaanalízisével foglalkozunk.

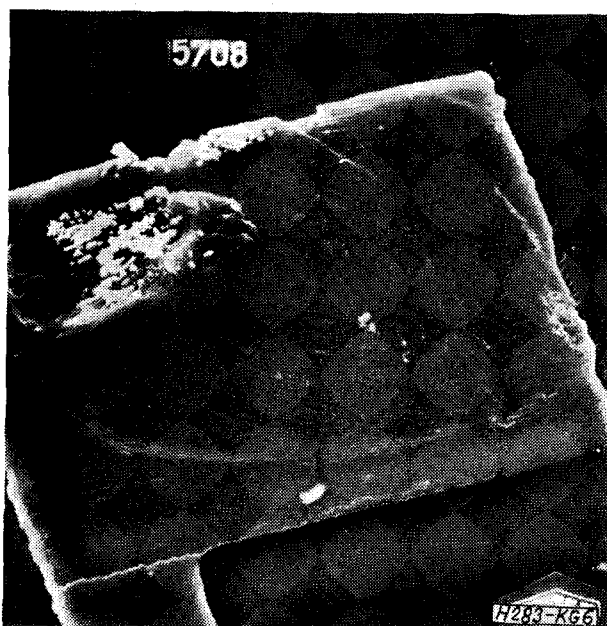
A 4. ábra egy integrált áramkör jóminőségű termokompressziós kötését mutatja. A gömb alakváltozása egyenletes, az Au-szál a gömb közepéből, túlfeszítettség nélkül, roncsolásmentesen folytatódik. A megnyomott rész felülete sima, a termokompressziós kapilláris minősége jó. A lapított rész palástján egyébként láthatók az erőhatás következtében fellépő csúszási vonalak. A termokompressziós kötés a kötési terület közepén helyezkedik el.



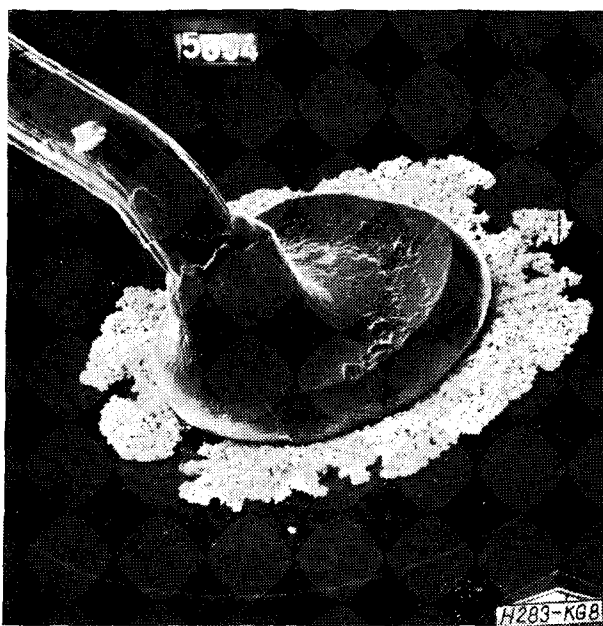
5. ábra. Selejtes, felvált termokompressziós kötés (PEM 300×)



7. ábra. Megcsúsztott termokompressziós gömbkötés (PEM 800×)



6. ábra. Az 5. ábra felvált kötése alatti alumínium (PEM 1000×)



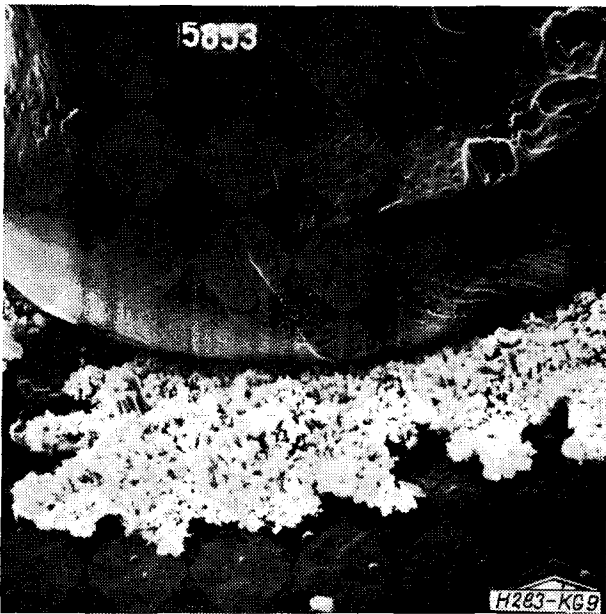
8. ábra. Megcsúsztott, pestises kötés planár tranzisztor emitterén (PEM 400×)

Az 5. ábra egy selejtes termokompressziós kötést mutat be. A gömb féoldalal alakváltozása és a termokompressziós kötésterület kis kiterjedése arra utal, hogy a nyomóerő hatásvonala nem a gömb középpontján haladt át.

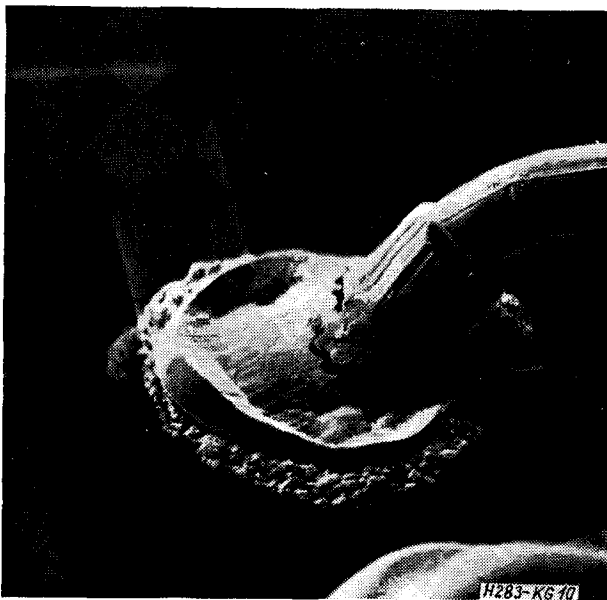
A 6. ábra az 5. ábrán látható kötésterület továbbnagyított részlete. Nyilvánvaló, hogy csak a kötés egy része volt megfelelő, míg a többi helyen csak mechanikai alakváltozásra utaló jelek figyelhetők meg. Jól látható a kontaktusterület számára a passzivációs rétegen nyitott ablak, bizonyítva a jó fotoreziszt-technikát.

A 7. ábra egy megcsúsztott termokompressziós kötést mutat. A megcsúsztást okozhatta vagy az elem ferde felforrasztása, vagy a kötési művelet egyéb hibája. A gömb lapitottsága és a kötésből kilépő Au-szál feszítettsége egyébként megfelelő.

A 8. ábrán egy megcsúsztott, ún. „pestises” kötés látható. A minta a felvét elkészítés előtt 7000 óras, 200 °C-on történő hőkezelést kapott (a kötés elektromosan egyébként még megfelelő). Megfigyelhető, hogy a pestises terület körvonala bizonyos mértékig követi az alakváltozás irányát. Ez feltehetőleg arra utal, hogy a termokompressziós



9. ábra. A 8. ábra kinagyított részlete a gömbön látható hajszálrepedéssel (PEM 1000×)



10. ábra. Selejtes termokompressziós kötés integrált áramkörön (PEM 300×)

művelet során a nyomásnak és a pestis kialakulásának az iránya között összefüggés áll fenn.

Megjegyzés: Pestisessé válik az Au-Al kötés, ha az átmenetén Au-Al intermetallikus fázisok jelennek meg. Különböző fázisok létrejöttét a hő- és a kötés-terület alatti Si katalizáló hatása idézi elő [4].

A 9. ábra ugyanennek a kötésnek egy továbbnagyított részletét mutatja be. A gömb oldalán hajszálrepedések figyelhetők meg, tehát a kötés a 7. ábrán látható eszközhöz viszonyítva „keményebb”, más ötvözőket tartalmazó Au-szállal készülhetett. A 10. ábrán egy újabb selejtes és pestises kötés látható. A kötés megcsúszott és a kivezető Au-szál túlfeszítettsége miatt repedések keletkeztek rajta.

Az ilyen kötés külső erőhatásra könnyen elszakad és katasztrofális meghibásodást idéz elő [5].

A 4-től a 10. ábráig terjedő képsorozat a kötések meghibásodásának különböző válfajait mutatta be.

Fémezési hibák

Szinterelési hibák

A kutatások másik, igen fontos területe a fémezzel kapcsolatos kérdéskör. A meghibásodást itt egyrészt az Au-Al-Si rendszer kölcsönhatása, másrészt az anyagvándorlási (migrációs) folyamatok idézik elő [6].

A 11. ábra egy olyan tranzisztort mutat be, melyen az oxidlépcsőnél a kivezető Al-fémezés szelektíven beoldódott az emitter- és bázisterületekbe. A 12. és 13. ábra a fenti eszköz egy-egy kinagyított részletéről készült. A magas szinterelő hőmérsékleten erős diffúzió lép fel [7]. A szilícium bediffundál az alumíniumba és a kontaktus ablaktól — az ott szilíciumban feldúsult alumíniumtól — a „tisztá” alumíniumtartományok felé vándorol.

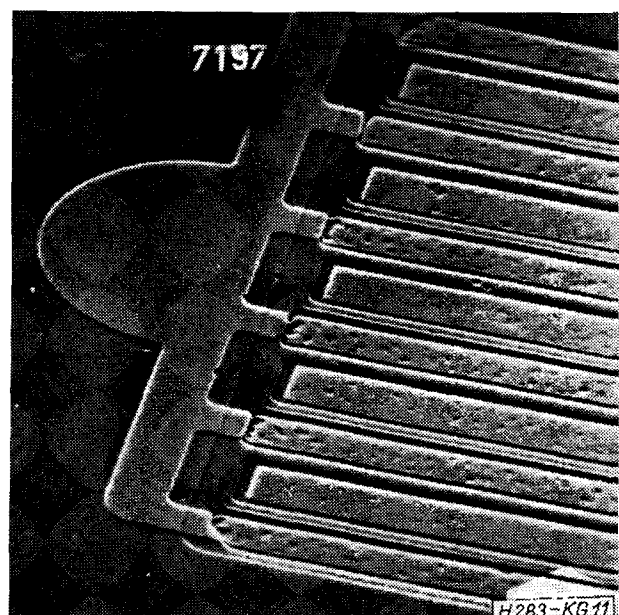
A 14. ábra ugyancsak ezt az eszközt mutatja, de a fémezés maratással történt eltávolítása után. Az emitter- és báziscsíkok végein, de mindig csak a kivezető felőli oldalon, beoldódási helyek figyelhetők meg. Hasonló beoldódás figyelhető meg integrált áramkörökön a magas szinterelő hőmérséklet hatására.

A 15. ábra egy jellegzetes, túlszinterelt fémezésű integrált áramköri részletet mutat.

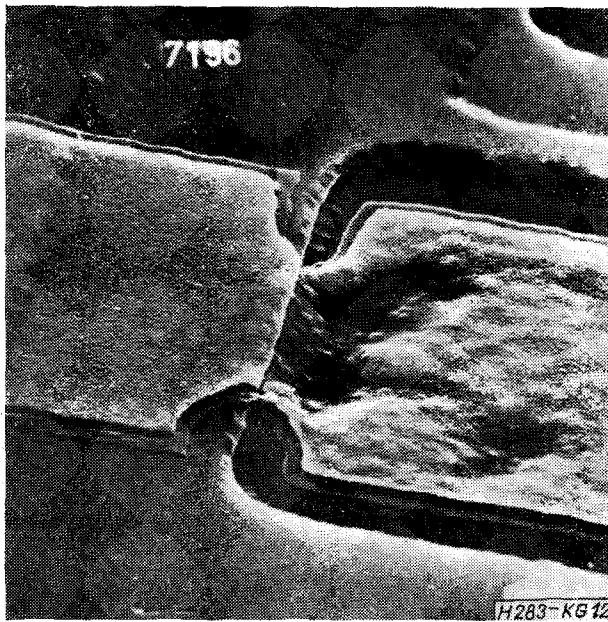
Diffúziós és migrációs hibák

A fémezési hibák másik nagy csoportja az adott áramsűrűség hatására fellépő diffúziós és migrációs folyamatokból ered.

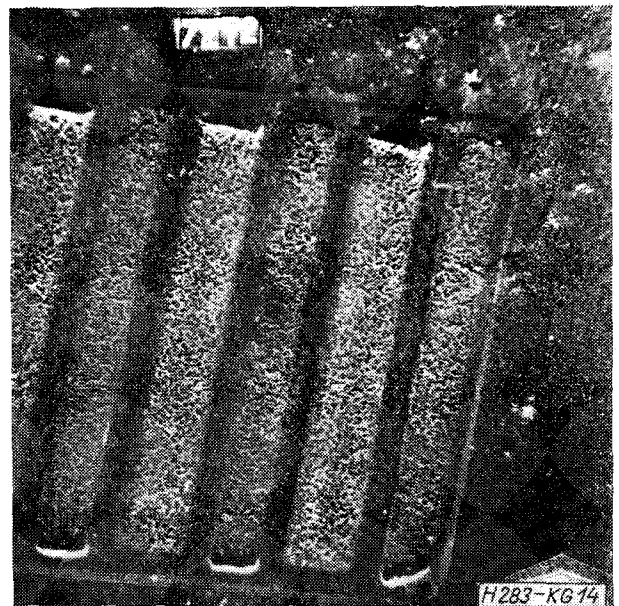
A 16. ábrán, az integrált áramköri részleten a kontaktusablakoknál keletkezett ún. „marási gödör-



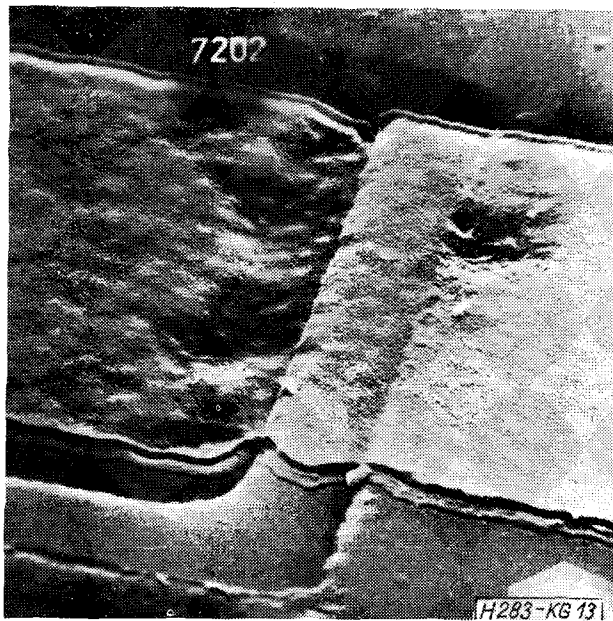
11. ábra. Tranzisztorstruktúra selejtes fémezéssel (PEM 300×)



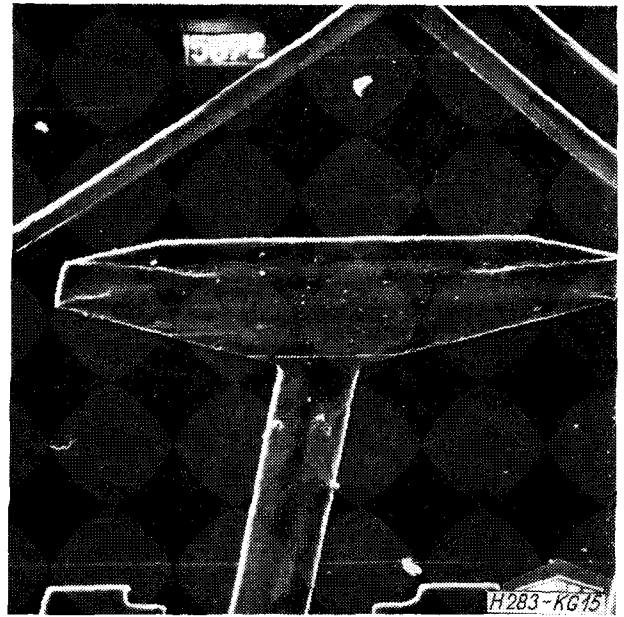
12. ábra. Az Al „beszívódása” és szakadása figyelhető meg az oxidlépcsőnél (PEM 10 000×)



14. ábra. A 11. ábrán látható tranzistorstruktúra a fémezés eltávolítása után (PEM 300×)



13. ábra. Az Al beoldódása látható az oxidlépcsőnél (PEM 10 000×)



15. ábra. Integrált áramköri részlet az ablaknál, a „beszívódás” jól megfigyelhető (PEM 300×)

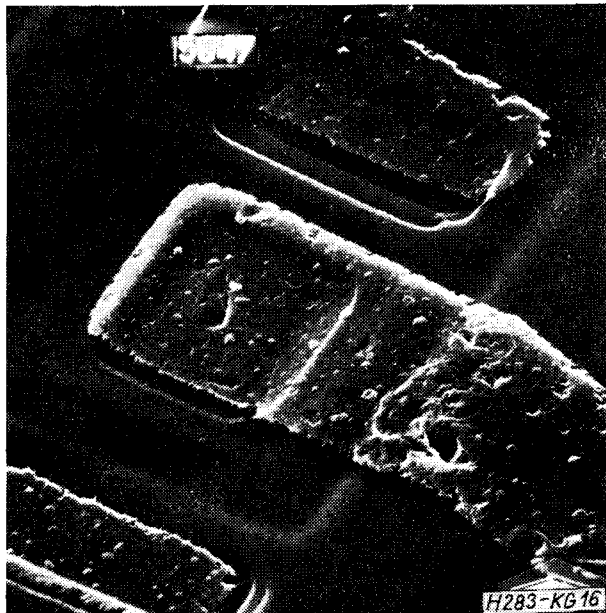
nek” [2] a szilíciumba való belenövése látható. A vezető fémcsíkon az oxidlépcsőnél a szilíciumkoncentráció növekedése miatt fellépő szemcsehatár-elkülönülés az alumínium pikkelyeződéséhez, majd kezdődő szakadásához vezetett [8].

A 17. ábra szerint egy porszemcse okozta rezisztívia a vezető fémcsik keresztmetszetének csökkenéséhez vezetett. A vezető élettartama a keresztmetszet változása következtében lecsökkent, mivel 150 °C-nál magasabb hőmérsékleten és $5 \cdot 10^4$ A/cm² áramsűrűség felett az élettartam kisebb, mint 10 év — ez a hiba az eszköz korai meghibásodását okozza.

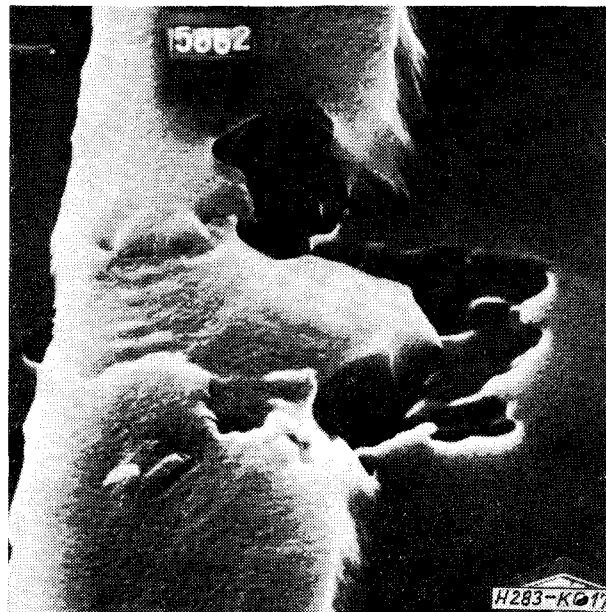
Következtetések

A dolgozatban bemutatott felvételek a pásztázó elektronmikroszkóp rutinszerű felhasználásának előnyeit bizonyítja. Tekintettel arra, hogy a minták előkészítést nem vagy csak igen kis mértékben (vékony aranyréteg felgőzölése) igényeltek, lehetséges nyilott tényleges technológiai folyamatok gyors ellenőrzésére is.

Természetesen a felvételek önmagukban ritkán nyújtanak teljes értékű felvilágosítást, ezért előnyös és gyakran elkerülhetetlen, hogy az elemzést egyéb,



16. ábra. Metallizációs meghibásodások integrált áramkörön (PEM 900×)



17. ábra. A látható keresztmetszet-csökkenés a fémezésben a helyi áramsűrűség-növekedéshez — a migráció, szakadáshoz fog vezetni (PEM 6000×)

a hibaanalízis szempontjából bevált vizsgálati eljárásokkal egészítsük ki. Értékes információkat nyújtanak a pásztázó elektronmikroszkóp feszültség- és vezetési kontrasztal készült felvételei, melynek ismertetését a jövőben tervezzük.

I R O D A L O M

- [1] Barna P.—Csanády A.-né: A pásztázó elektronmikroszkóp és felhasználási területei a fémiparban. Kohászat (1972) 105. 11. szám 489 oлд.
- [2] Kalmár G.: Monolit integrált áramkörök néhány jellegzetes meghibásodási módja, különös tekintettel a metallizációs problémákra. Híradástechnika (1973) 24. 11. szám 345 oлд.

- [3] Stefániay V.: Egykristály szeletekre felvitt felületi réteg deformációs hatásának vizsgálata röntgendiffrakciós módszerekkel. Mérés és Automatika (1969).
- [4] E. Philofsky: Intermetallic Formation in Gold-Aluminum Systems. Solid-State Electronics (1970) Vol 13 pp. 1391—1399.
- [5] Kalmár G.—Komlossy É.: TUNGSRAM műanyagtokozott TTL integrált áramkörök megbízhatósága. Híradástechnika (1973) 24. 10. szám, 312 oлд.
- [6] G. S. Prokop—R. R. Joseph: Elektromigration Failure at Aluminum-Silicon Contacts. J. Appl. Phys. (1972) Vol 43. No. 6 2595—2602
- [7] Robert J. Anstead—Samael R. Floyd: Thermal Effects on the Integrity of Aluminum to Silicon Contacts in Silicon Integrated Circuits. IEEE Transactions on Elektron Devices (1969) ED 16 No. 4. 381—386
- [8] James R. Black: Elektromigration Failure Modes in Aluminum Metallization for Semiconductor Devices. Proceedings of the IEEE. (1969) Vol 57. No. 9. 1587—1593