

Mikrohullámú alkatrész-gyártáshoz használható félvezető anyagok minősítése

ETO: 621.315.592.029.6.001.36

A korszerű távközlési rendszerek alapvető eszközei a mikrohullámú félvezető alkatrészek. Más félvezető alkatrészekhez viszonyítva ezek csak kis részét képezik a félvezető eszközök piacának. Történetük és fejlődésük mindazonáltal különösen érdekes jellegzetességet mutat. 2 μm csatornahosszúságú GaAs FET-eket például már tíz évvel ezelőtt is gyártottak. A modern IC-gyártásban viszont még csak mostanában alkalmazzák ezt a mérettartományt.

Az ilyen kis méretek használatát az a tény teszi szükségessé, hogy a mikrohullámú alkatrészek ún. futásidőeszközök. A futásidőt az az idő határozza meg, amelyre a töltéshordozónak szüksége van, hogy pl. egy FET csatornáján vagy egy PIN-dióda intrinszc-tartományán keresztülhaladjon. Egy rögzített L úthosszhoz tartozó futási idő függ még a töltéshordozó v mozgási sebességétől, az E_p maximális térerőtől és a letörési feszültségtől.

Egyidejűleg az E_p térerősséget létrehozó V_m potenciálkülönbség nem lépheti túl a letörési feszültséget.

Ezek a paraméterek egyrészt vagy anyagi minőségtől függenek, vagy az alkatrész-konstrukció határozza meg értéküket. A maximális térerősséget például a félvezető anyag dielektromos együtthatója rögzíti: a letörési feszültség vagy a bázis töltéshordozó koncentrációjától, vagy a réteghordozó koncentráció gradiensétől függ. Az ilyenfajta félvezető-anyag-jellemzők meghatározása nem okoz nehézséget, mindössze az ellenállást és a töltéshordozó koncentrációt kell mérni.

Más részről azonban, ha a gyártási kihozatalt, a jól sikerült szeletek számát tekintjük, valószínűleg néha különbség lehet az előírt anyagjellemzők és a megvalósult eredmény között. Ezt a témát kicsit részletesebben megvizsgáljuk a következőkben.

A fent említett paraméterek képezik vizsgálatunk kiindulópontját. Azt akarjuk mind makroszkopikus, mind pedig mikroszkopikus méretekben vizsgálni, milyenek a mikrohullámú alkatrész előállítására alkalmas anyagok. A dolgozat címét így is módosíthatnánk: Egy mikrohullámú felhasználási célra előírt félvezető anyag mikor eredményez rossz gyártási kihozatalt?

A legtöbb kihozatalcsökkenést okozó paraméter a következő csoportok valamelyikébe sorolható:

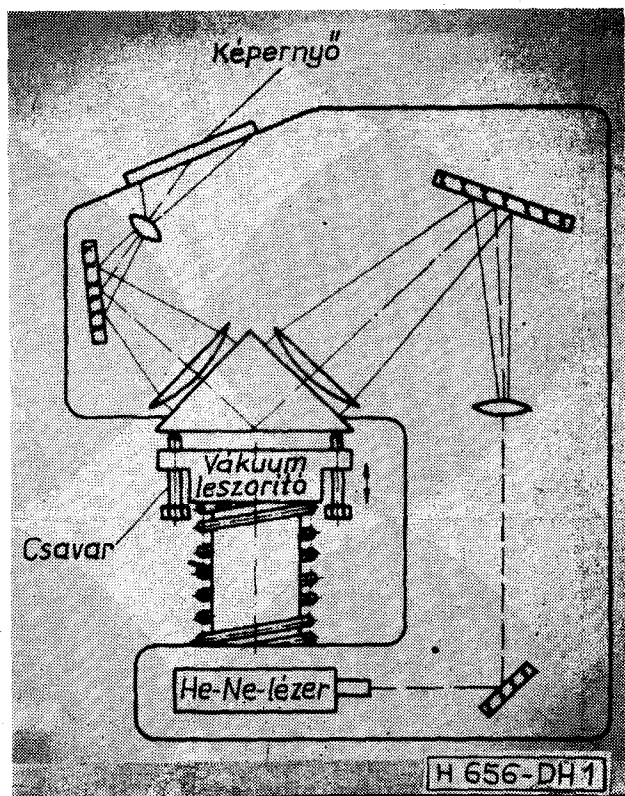
- a megmunkáló művelet minősége: pl. felület síkságának tökéletessége,
- kristályhibák, diszlokációk, oxidáció keltette hibák,

- anyagjellemzők megmunkálás közbeni olyan megváltozása, amely összefügg a kiinduló anyag minőségével.

1. Sík felület

A mai félvezetőelem-gyártási folyamatokban az eszközstruktúra kialakítása a jól ismert kontakt vagy projekciós litográfiai módszerekkel történik. Ezek a műveleti lépések viszont rendkívül sík hordozó felületet követelnek. Minél kisebb vonalszélességet kell megvalósítani, annál kisebb az alkalmazott optikai berendezés fókusztávolsága. Ezért alapkövetelmény az, hogy a szelet felületének minden része a leképező rendszer fókusztávolságán belül legyen. Ha a felület nem teljesíti ezt az előírást, akkor az elemméretek nem tarthatók az előírt tűrésen belül.

A felület síkságának a mérésére különböző mérési módszerek állnak rendelkezésre. Az 1. ábrán egy optikai interferencia elvén működő síkságmérő rendszer vázlatát ismertetjük. Ez a rendszer egy ideális felülettel összehasonlítva méri a valódi szelet felü-



1. ábra. Síkságellenőrző berendezés vázlatos rajza



2. ábra. Szabványos 3 inch átmérőjű Si szelet síkság topogramja

letén lévő domborulatok és mélyedések nagyságát. A rendszer alapvető jellemzői:

a) Valódi képet szolgáltat, vagyis a felület topogramját, így a legmagasabb kiemelkedés- és mélységértékek könnyen számíthatók.

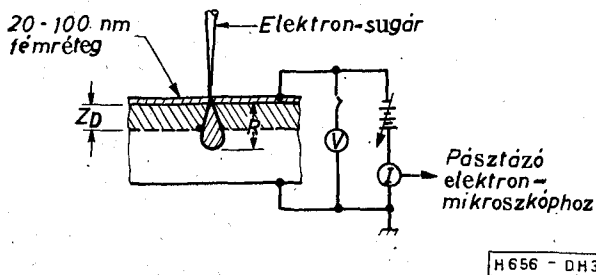
b) Mivel optikailag sík vákuumleszorítót használ a félvezető szelet rögzítésére, a maszk illesztéssel azonos körülmények között mér.

A 2. ábra egy olyan „valódi szelet” felületét mutatja, ami megközelítőleg 2 μm -en belül sík. A szabványos 3 inch-es szeletek síksága ma már jobb, mint 3 μm .

2. Kristályhibák

A töltéshordozók mozgássebességét és az őket mozgató elektromos térerősséget befolyásoló hatásuk miatt a különböző kristályhibák lényegesen leronthatják az elkészült félvezető eszközök jellemzőit és teljesítményét. A mai minőségelírások mellett már nem érdemes diszlokációkról, iker képződésről vagy hasonló hibákról beszélni. Mostanában a diszlokációmentes szilíciumban előforduló hibák egy speciális osztálya, a feldolgozási művelet által okozott, ugyanakkor a nyersanyag eredeti tulajdonságaitól is függő hibák közismerten: oxidáció okozta hibák — vagy swörlök — vonták magukra a figyelmet.

A 3. ábrán bemutatunk egy eszközorientált anyagvizsgálati módszert. A módszer pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) elektronsugara által a vizsgált anyagban keltett elektronáramnak a térbeli változását jeleníti meg, innen a módszer angol neve EBIC (Electron Beam Induced Current) [2].



3. ábra. EBIC mérőrendszer elvi vázlata

Az elektronmikroszkóp pásztázó elektronsugara elektron—lyuk párokat gerjeszt a félvezető mintában. Ezek a töltéshordozók fotoáramot hoznak létre a minta felületén kialakított Schottky-kontaktuson, vagy egy p—n átmeneten. A fotoáram térbeli változásait TV-képernyőn megjeleníti a műszer. Ezeket a térbeli változásokat az alapanyag kisebbségi töltéshordozói diffúziós úthosszának, vagy ami ezzel egyenértékű, azok élettartamának térbeli változása okozza.

Egy 1100 °C hőmérsékleten nedves oxigénáramban négy óra hosszúig oxidált szilícium szelet EBIC képet mutatjuk be a 4. ábrán. A sötét foltok megnövekedett rekombinációs áramot jelentenek. További, metallográfiai (marási) vizsgálatok kimutatták, hogy ezek a foltok oxidáció által okozott illeszkedési hibák következményei.

Ha ilyen hibák jelennek meg a tértöltésrétegben, akkor az elektromos térerő értékének helyi megváltozását okozhatják, aminek helyi letörés lehet az eredménye. Tovább rontja a helyzetet, ha ilyen illeszkedési hibák összekapcsolódnak a hőkezelési műveletek okozta szennyeződéssel. Ismeretes, hogy az illeszkedési hibák getterezik (azaz környezetükben összegyűjtik) a nehézfém-szennyezőket, mint pl. Au, Fe, Cu, Ni stb. [3].

A getterező hatás idegen anyagkiválásokat (precipitátumokat) okoz, amelyek nemcsak a záróirányú áramot növelik Schockley—Reed—Hali-centrumokat [4] képezve, hanem az elektromos térerősséget is tovább növelik.

A megnövekedett térerő tunel vagy téremisszióval lavinát hoz létre, ami végül úgynevezett másodfajú letörést eredményez, ezzel végleg tönkretéve az eszközt.

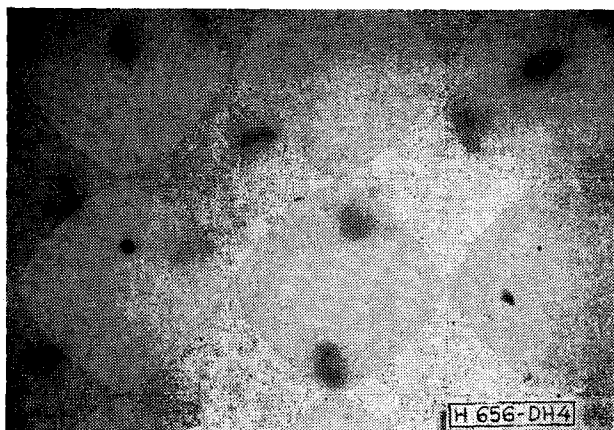
Az EBIC-módszerrel kimutatott elektromosan aktív hibák és az oxidáció után alkalmas maratási módszerek feltárt hibák között jó korreláció állapítható meg. Ezért az ilyen anyaghibák szempontjából végzett minőségellenőrzés könnyűszerrel elvégezhető úgy, hogy a feldolgozási művelettel azonosan végzett oxidáció után maratási vizsgálatokat végzünk.

A következő néhány kép ilyen szörlöket mutat különböző oxidációs vizsgálatok után (lásd 5., 6. és 7. ábrák).

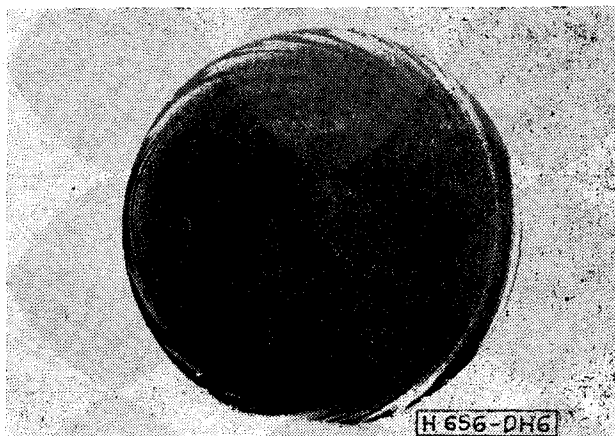
Főleg a két következő oxidációt vizsgáltuk:

- a) 1000 °C-os oxidáció:
 - betolási és kihúzási sebesség: 10 cm min⁻¹,
 - műveletek: 10 min száraz O₂,
 - 160 min nedves O₂,
 - 10 min száraz O₂;
- b) Ramp oxidáció:
 - betolási, kihúzási sebesség: 10 cm min⁻¹,
 - parkoló hőmérséklet: 900 °C,
 - felfűtés 1200 °C-ra száraz O₂ áramban,
 - 120 min nedves O₂,
 - lehűtés 900 °C-ra száraz O₂-ben.

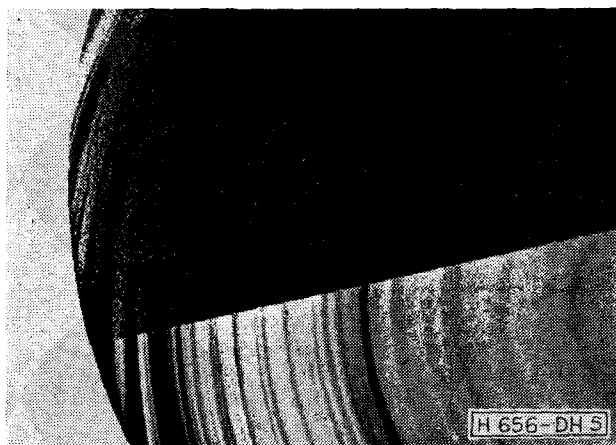
Oxidáció után a keletkezett szilíciumdioxid-réteget HF-ben lemartuk, majd a szeleteket Širtl- [5] vagy Secco- [6] féle marószerekben kezeltük 10 min-ig. A kristályhibák létrejötte, vagyis a nukleáció folyamata függ az oxidálás hőmérsékletétől és bizonyos mértékben az időtartamától is [7, 8]. Az 5. ábra



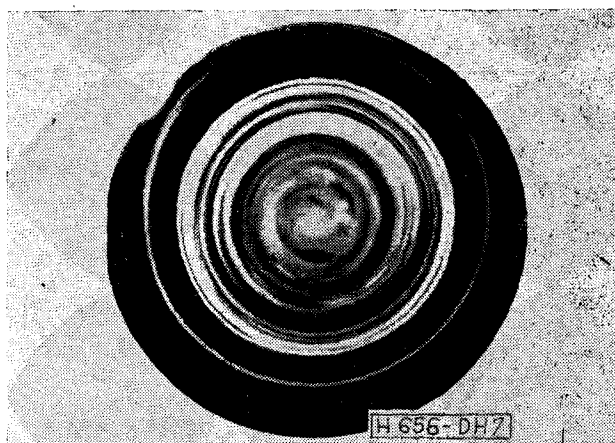
4. ábra. n(100) Si felületén keletkezett oxidáció okozta illeszkedési hibák EBIC képe



6. ábra. Illeszkedési hiba szvörl ramp oxidáció után



5. ábra. Szvörlök különböző típusú oxidáció után



7. ábra. „Hillock” hibákból álló szvörlök 1000 °C-os oxidálás után

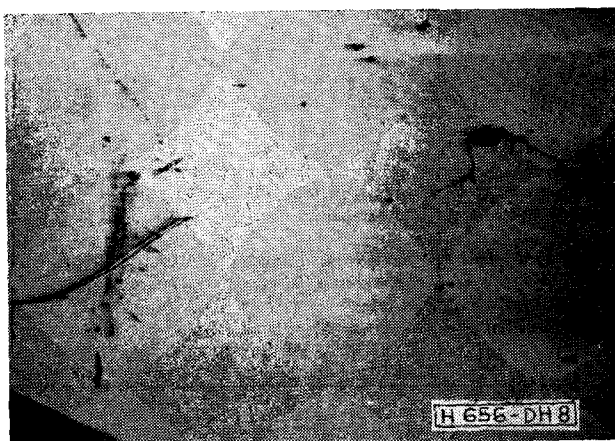
ugyanazon szelet két fél darabját mutatja. A felső részt ramp-oxidációnak, az alsót pedig 1000 °C-os oxidálásnak vetettük alá. A felső félkép néhány gyűrűszerűen kontrasztos képződményt mutat, amelyek nagy sűrűségben illeszkedési hibákat tartalmazó tartományok, és az egész felületet sűrűn befedik az ilyen hibák. Ezek a hibák közismert alakú illeszkedési hibák, melyeknek a hossza az oxidálás hőmérsékletére jellemző.

A kép alsó felén nagyszámú keskeny gyűrűvonal látható, amelyeket sűrűn elhelyezkedő „hillock” alakzatok hoznak létre.

A 6. és 7. ábrák további példákat mutatnak a szvörl hibák előfordulására. A 6. ábrán ismét illeszkedési hibákból álló szvörlök, míg a 7. ábrán ugyanabból a kristályrúdból származó 1000 °C-os oxiteszt vizsgált szelet képe látható. A modern szvörlmentes szilíciumgyártás jól ellenőrizhető ezzel a módszerrel. A következő vizsgált nyersanyag a GaAs, amely mikrohullámú FET céljára a nagyobb töltéshordozó mozgékonyosság miatt jobb, mint a szilícium. Itt is nagyon jól használható az EBIC-módszer a hibaanalízisre.

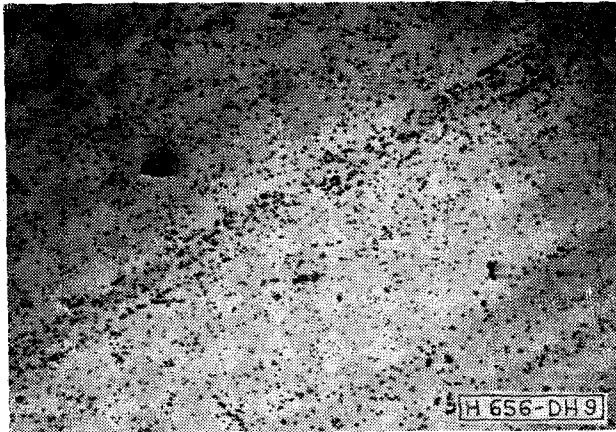
A 8. ábra mikroszkopikus felület alatti karcot mutat a GaAs hordozón (SCHOTTKY-kontaktussal).

A 9. ábrán elektromosan aktív diszlokációk láthatók gőzfázisból növesztett GaAs_{0,6} P_{0,4}-rétegben.



8. ábra. GaAs hordozó felületén lévő mikrokarcolás EBIC képe

A legtöbb mikrohullámú eszköz készítésénél a GaAs-t folyadékfázisból épített epitaxiális réteggel borítják, vagy ionimplantáció után hőkezelésnek vetik alá. A GaAs bináris jellege és a nagy As gőznyomás miatt a felület fajlagos ellenállása, esetleg még a vezetési típusa is megváltozhat. Az ilyen viselkedésmód egyik lehetséges oka a kristály vakancia-



9. ábra. Gőzfázisú epitaxiával épített $\text{GaAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}$ epiréteg EBIC képe diffúzió után

intersticiós atom arányának a stöchiometrikus értéktől való eltérése [8]. Ez hátrányosan befolyásolja az ilyen tulajdonságú anyagból készített FET-ek csatornaméreteit.

Ezen anyagjellemző minőségellenőrzésének is egy-

szerű a módszere: az eszközkészítés műveleti előírása szerint végzett hőkezelés — a hőkezelés hatására nem szabad ellenállásváltozásnak bekövetkezni.

IRODALOM

- [1] Turner, J. A.—Waller, A. J.—Bennett, R.—Parker, D.: Proc. of the 3rd Int. Symposium on GaAs and related compounds. Inst. of Phys. London; Conf. Series No. 9.
- [2] lásd pl.: deKock, A. J. R.—Ferris, S. D.—Kimmerling, L. C.—Leamy, H. J.: J. of Appl. Phys. Vol. 48. No. 1. (1977. jan.) p. 301.
vagy Kato T.—Koyoma H.—Matsukawa T.—Shimizu R.: J. of Appl. Phys. Vol. 45. No. 9. (1974. szept.) p. 3732.
- [3] Busta, H. H.—Wagner, H. A.: J. of Electrochem. Soc. Vol. 129. No. 9. p. 1424. (1977)
- [4] Hall, R. N.: Phys. Rev. Vol. 83. p. 228. (1951) és Vol. 87. p. 387. (1952),
továbbá: Shockley, W.—Read, W. T. Jr.: ugyanott Vol. 87. p. 835.
- [5] Sirl, E.—Adler, A.: Z. Metallkunde Vol. 52. p. 529. (1961)
- [6] Secco d'Aragona, F.: J. of Electrochem. Soc. Vol. 119. p. 948. (1972)
- [7] Yue, J. T.—Ruiz, H. J.: Proc. of the 3rd Int. Symposium on Silicon Materials and Technology. Vol. 77—2. The Electrochem. Soc. Princeton. 1977; p. 596.
- [8] Pearce, C. W.—Rozgonyi G. A.: ugyanott p. 606.