

GaAs alapú Gunn-diódák a 7—10 GHz-es frekvenciasávra

ETQ 546 681'19:621 373 51 029 64:621.382.2

A mikrohullámú rendszerekkel szemben támasztott növekvő minőségi követelmények új típusú áramköri elemek kifejlesztését igénylik. A félvezető technológia eredményeire támaszkodva ezeknek az igényeknek a kielégítésére egyrészt a hagyományos félvezető eszközök működési tartományát terjesztették ki a mikrohullámú sávokra, másrészt a területefélvezetők kutatása és gyártástechnológiája verőn elért eredmények lehetővé teszik a hagyományos eszközök működési elveitől eltérő, új elveken működő eszközök létrehozását. A Gunn által felfedezett, majd a róla elnevezett effektus egyike azon új jelenségeknek, amelyek elvileg új, igen nagy frekvenciás félvezető eszközök készítésére nyújtanak módot. A Gunn-jelenség elméletét, s a Gunn-eszközök fizikai alapjait az [1—3] irodalmi források ismertetik.

Az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézet célul tűzte ki a hazai elektronikai ipar igényeinek megfelelően GaAs alapú Gunn-diódák kifejlesztését, és ezzel kapcsolatos alapvető kutatómunka elvégzését, az eszköz technológiájának kidolgozását és realizását. E munka első fázisa sikeresen lezárult, s eredményéről, a munka során nyert tapasztalatokról, a kifejlesztett Gunn-diódák főbb tulajdonságairól e helyen számolunk be. A kidolgozott technológia és berendezések biztosítják az igényeknek megfelelő paraméterekkel rendelkező GaAs alapú Gunn-dióda előállítását, mely folyamatos üzemben minimálisan 30 mW mikrohullámú teljesítményt szolgáltat 1—6% hatásfokkal a 7—10 GHz-es sávban.

Az alapanyagok előállításáról, egyes fizikai, illetve technológiai problémák vizsgálatáról, illetve megoldásáról a [5—24] közleményekben számoltunk be.

1. Gunn-diódák konstrukciós kérdései

A Gunn-dióda a GaAs és a hasonló sáv szerkezetű félvezető anyagoknak azt a tulajdonságát hasznosítja, hogy elegendően nagy térerősség hatására (≥ 3 kV/cm) negatív differenciális ellenállással rendelkeznek. Ismeretes, hogy a negatív differenciális ellenállás azt eredményezi, hogy az anyagban keletkező fluktuációk erősödnek, és az egyébként homogén anyagban nagy és kis elektronkoncentrációjú tartományok, domének alakulnak ki. Ezek az anyagban az elektronok drift sebességével haladnak, és a minta két végén található kontaktusokat elérve, azokon áramingadozásokat okoznak. A fenti jelenség, a Gunn-effektus, a homogén anyag sajátossága, független az áram bevezetésére szolgáló kontaktu-

soktól, bár azok tulajdonsága a jelenséget erősen befolyásolhatja. Az elektronok drift sebessége $v_d \approx \approx 10^7$ cm/s. Így az áramingadozás frekvenciája f cm hosszú minta esetén v_d/f -nek adódik, 7 GHz frekvencia esetén az aktív réteg hosszúságú tehát ≈ 14 μ m. Így a két végén kontaktussal ellátott, megfelelő vastagságú GaAs kristály mikrohullámú oszcillátorként használható. Valamennyi Gunn-dióda ezen az elven működik, a felépítésbeli apróbb különbségeket a működésből eredő gyakorlati problémák határozzák meg. A Gunn-dióda hatásfoka a tértöltési tartomány alakjától és közvetve a réteg hőmérséklettől függ. A tértöltési tartomány alakját a szabad elektronok koncentrációja határozza meg. Az elektronkoncentráció optimális értékére a dióda aktív hosszát használva a következő kifejezés adódik [2, 3]:

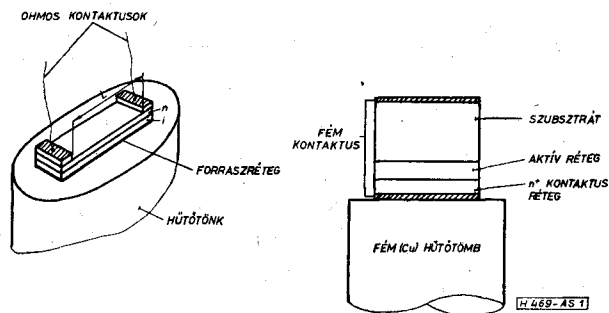
$$nl \approx 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

Ez 7 GHz-es dióda esetén kb. $1,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ elektronkoncentrációnak felel meg, tehát a gyakorlati szempontból számbajövő alapanyag rendkívül tiszta kell hogy legyen, még a félvezető ipar gyakorlatában is. A tisztasági követelményeket tovább fokozza, hogy az elektromosan nem aktív idegen szennyezések (csapdák, rekombinációs centrumok) is károsan befolyásolják a dióda működését, illetőleg hatásfokát.

Az igen vékony aktív tartomány a gyakorlati kivitel során (néhány speciális kísérleti példánytól eltekintve) lényegesen vastagabb, nem aktív kristályszakaszhoz illeszkedik. Hogy a működésnek megfelelő nagy térerősség az aktív tartományban elérhető legyen, mind a passzív tartománynak, mind pedig a hozzávezetést biztosító kontaktusoknak az ellenállása az aktív tartomány ellenállásával összehasonlítva kicsi kell, hogy legyen. Ellenkező esetben az ezekben a tartományokban disszipálódó teljesítmény tovább növeli a kristály hőmérsékletét.

Az igen nagy térerősség és az anyag nem túl nagy fajlagos ellenállása következtében folyó tekintélyes áramsűrűség miatt az aktív tartományban rendkívül nagy teljesítmény disszipálódik. Az így keletkező hő elvezetése csak kis aktív térfogattal valósítható meg; mivel a hatásfok a hőmérséklet emelkedésével rohamosan csökken, folyamatos üzemmód esetén a dióda működéséhez igen jó hőelvezetési körülményeket kell biztosítani.

Az eredeti Gunn-féle dióda két, ohmos kontaktussal ellátott vékony GaAs lemezből állt. A korszerű Gunn-dióda konstrukciónál a kristály nagytisztaságú, nagy elektronmozgékonyosságú n-GaAs, amelyet erősen n-típusú (n^+), más esetben félszigetelő rétegre növesztenek olvadék vagy gőzfázisú epitaxiás réteg-



1. ábra. a) Planáris Gunn-dióda vázlata
b) Szendvics típusú Gunn-dióda metszete

növesztési eljárással. Az 1a ábrán félszigetelő GaAs-re növesztett, ún. planáris Gunn-dióda vázlatos képét láthatjuk. Az áram be- és kivezetés az 1 és 2 kontaktusokon keresztül történik. A kristályelemet a hűtőtömbre a félszigetelő rétegre felpárologatott forrasztóréteggel vagy Au-Ge eutektikum lapkával forrasztjuk fel. A planáris elrendezéssel elérhető teljesítményt az eszköz viszonylag nagy hőellenállása korlátozza.

Az 1b ábrán a $n^+(n)n^+$ – szendvics típusú Gunn-dióda szerkezetét mutatjuk be. Az ilyen kialakítású kristályelemet kétféleképpen forrasztjuk be a tokba. Kisebb teljesítményű diódákat ($P \lesssim 30$ mW) általában úgy készítik, hogy a hordozó réteget forrasztják fel a hűtőtömbre. A másik kivezetést az n-rétegre felvitt kontaktusréteghez erősített arany-szál vagy szalag adja. Ilyen kiserelési technika alkalmazása mellett az elérhető teljesítményt úgyszintén a viszonylag nagy hőellenállás korlátozza.

Közepes és nagy teljesítményű eszközök készítésénél az aktív réteget forrasztják fel a hűtőtömbre, így a katódkontaktusnál keletkező hőáram a legrövidebb úton jut a hűtőtömbbe, a hőellenállás számottevően lecsökkenthető. Ez a kiserelési módszer, a kristálymorzsa kis mérete miatt, nagy nehézséget jelent. Növeli a kiserelés nehézségeit, hogy a hűtőtömbön levő nemesfémbevonat, illetve a forrasztóréteg, még kis mértékben sem futhat fel a kristály oldalán, mert ez rövidre zárhatja az aktív réteget vagy annak egy részét. A felforrasztás megkönnyítésére gyakran a felvitt ohmos kontaktust galvanikusan megvastagítják, így a felforrasztást egyszerűsíteni lehet, igaz a hőellenállás némi növelése árán.

A megfelelően kis soros kontaktusellenállást biztosító ohmos kontaktus előállítása az aktív réteg nagy hőterhelése miatt nagyon fontos feladat. Tekintve, hogy a Gunn-doménokban nagy, az anyag lavinaletörési feszültségéhez közelálló télerősség uralkodik, bármely, a rétegben, ill. a kontaktusokban levő inhomogenitás a dióda működésének meggátolására vezethet.

Általában, széles töltéshordozó koncentráció tartományban használható ohmos kontaktust adó univerzális anyag GaAs-re nem ismeretes, az egyes eszközök szabta követelményeknek optimálisan megfelelő kontaktus anyagok és kontaktálási eljárások azonban léteznek. A jó kontaktus anyag megfelelő elektromos és mechanikai tulajdonságokkal bír és kompatibilis a további kiserelési technológiával. A leglényegesebb követelmény az, hogy a fajlagos soros kontaktus ellenállás elhanyagolhatóan kicsi és

az I–V görbe az origóra szimmetrikus legyen. A soros kontaktus ellenállás — a viszonylag kis ellenállású aktív réteg miatt — nagyobb frekvenciákon dominálónak válhat; a rajta eső gerjesztő-teljesítmény tovább növeli az üzemelő kristály amúgy is rendkívül nagy hőterhelést ($\sim 10^6$ W/cm²).

A fenti követelményeknek megfelelő elektromos kontaktusok úgy állíthatók elő, hogy a kontaktus környezetében erősen adalékolják a félvezetőt, így a fém-félvezető határfelületen létrejövő potenciál-gát alagúthatás következtében átjárható lesz. A jó fémkontaktus rendszerek ennek megfelelően felületi adalékanyagot, valamint más szempontok szerint megválasztott fémeket tartalmaznak, melyek biztosítják a kontaktusövezet olvadás-, ill. eutektikus pontjának, mechanikus tulajdonságainak (nedvesítés, tapadás, hőtágulás stb.), elektromos tulajdonságainak (Schottky-gát magassága, felületi állapotok sűrűsége, egyenáramú és nagyfrekvenciás tulajdonságok) kívánt beállítását.

GaAs felületi adalékolására a periodosus rendszer IV. oszlopának elemeit (Ge, Si, Sn, Pb) vagy In-ot használnak. Ezek közül technológiai nehézségek miatt az ólmot és a szilíciumot erre a célra ritkán alkalmazzák. A kontaktusok további összetevőjeként általában Au-at vagy Ag-t használnak. Az ilyen összetett fémrendszerből megfelelő kontaktusok kialakítása képezi a Gunn-dióda technológia egyik sarkalatos lépését.

2. Gunn-diódák készítése

2.1. Szelet előállítás

A Gunn-diódák és egyéb mikrohullámú félvezető-eszközök alapanyagául szolgáló nagy tisztaságú GaAs réteget epitaxiális növesztéssel állítják elő. A két legelterjedtebb epitaxiális eljárás az AsCl_3 -Ga-H₂ gőzfázisú növesztés és a GaAs-Ga folyadékfázisú növesztés [4]. Mindkét eljárás — megfelelő körülmények között — alkalmas extrém nagy tisztaságú epitaxiális GaAs rétegek növesztésére, amelyek tisztasága azonos szintű az iparilag előállított tiszta Ge és Si kristályok minőségével. Gondosan ellenőrzött körülmények között ily módon 10^{13} – 10^{14} cm⁻³ elektronkoncentrációjú GaAs rétegek növeszthetők, melyek elektronmozgékonyasága szobahőmérsékleten 8500–9000 cm²/Vs, 77 K hőmérsékleten pedig nagyobb, mint 200 000 cm²/Vs [4, 5, 10].

Laboratóriumunkban a GaAs epitaxiális rétegeket folyadékfázisú módszerrel növesztettük, mivel ez az eljárás nagy tisztaságú rétegek előállítására előnyösebb. Végeztünk technológiai jellegű kutatás-fejlesztést a gőzfázisú epitaxia megvalósítására is.

A folyadékfázisú epitaxiális rétegeket kétféle elrendezett rendszerben növesztettük. Az egyik rendszer billenthető horizontális reaktorcsőben elhelyezett kvarc vagy grafit csónakból állt, a másik rendszer pedig ugyancsak vízszintes reaktorcsőben elhelyezett grafit kazettából állt, mely utóbbiban több párhuzamos (egyidejű) növesztés volt elvégezhető [5, 10, 24].

Nagy gondot fordítottunk az egész növesztő rendszer tisztaságára és lyukmentességére, az alkatrészek tisztaságára. A növesztésnél alkalmazott védőgáz-

atmoszféra nagy tisztaságú, katalitikus tisztítóegységből vagy Pd-diffúziós cellából nyert hidrogén volt, a GaAs-Ga rendszerben a Ga-olvadék 6 N tisztaságú volt, a beoldásra kerülő GaAs pedig $n=10^{15}-10^{16}$ cm^{-3} és $\mu=5000$ cm^2/Vs paraméterekkel rendelkezett.

A hordozólapkák kb. 250 μm vastagságú $10 \times 10 - 14 \times 14$ mm^2 feleletű, [100] orientációjú GaAs lemezek voltak. A Gunn-szerkezetek és diódák céljaira szolgáló növesztéseknél a hordozókristály alacsony fajlagos ellenállású n^+ GaAs volt, az epitaxiális rétegek elektromos tulajdonságai vizsgálatára szolgáló mintákat pedig felszigetelő, Cr-mal adalékolt ($\rho \geq 10^8$ ohmcm) hordozóra növesztették. A hordozólapkák felületét közvetlenül a növesztés előtt megfelelő módon mechanikailag és kémiaailag políroztuk.

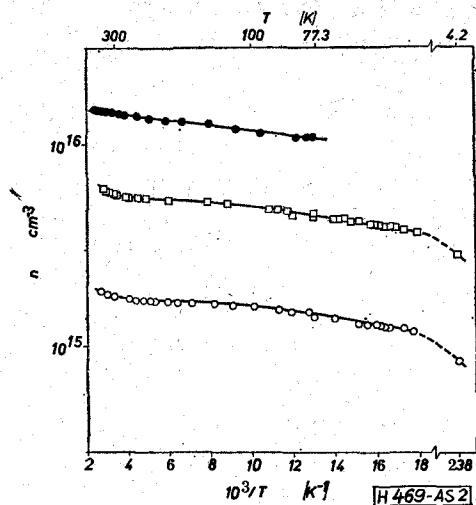
A rétegnövesztés hőmérséklete kb. 800 $^\circ\text{C}$ volt, a hűtési sebesség 0,25–1,0 $^\circ\text{C}/\text{perc}$, a réteg növekedési sebessége pedig 0,25–0,5 $\mu\text{m}/\text{perc}$ volt. A hőmérsékleti programot elektronikus–mechanikus vezérlőegység szabályozta. A rendszer hűtését a kívánt vastagságú (legtöbbször 10–15 μm) epitaxiális réteg kialakulásáig végeztük, majd az olvadéknak a kristály felületéről való eltávolítása után a kályha a fűtés kikapcsolásával hűlt le.

2.2. Szelet minősítés

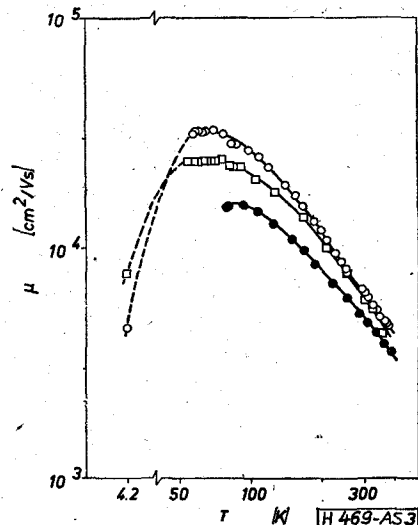
A Gunn-dióda előállításához szükséges $n^+ - n$ többrétegű epitaxiális szerkezeten még a kiszerezés előtt több ellenőrző mérést kell végezni, melyek alapján következtetni lehet a szerkezet minőségére s a kész eszköz mikrohullámú paramétereire, ill., ha a kész eszköz nem felelt meg a konstrukciós követelményeknek, részben a szeleten elvégzett mérések alapján el lehet különíteni a hibát okozó technológiai lépést. A többrétegű epitaxiális szerkezetek teljes minősítő mérése magában foglalja az $n^+ - n$ szerkezeteken és a felszigetelő hordozóra növesztett n rétegeken elvégzett minősítő méréseket.

A minősítés során általában az epitaxiális rétegeken Halli-effektus (töltéshordozó koncentráció), fajlagos ellenállás és töltéshordozó mozgékonyág méréseket végeztünk. A mérések hőmérsékleti tartománya 77–400 K. Esetenként méréseket végeztünk 55 és 77 K között vákuumozott nitrogén fürdőben, illetve 4,2 K-en folyékony héliumban [10] is.

A négyszögeletes mérési minták mérete kb. $3 \times 3 - 5 \times 5$ mm^2 volt, az epitaxiális réteg felületére négy sarkán 300–400 μm átmérőjű indium golyókat ötvöztünk az elektromos hozzávezetések céljából. A méréseket van der Pauw módszere szerint végeztük el. A rétegek elektromos jellemzőit igen nagyszámú mintán határoztuk meg. A szoba-hőmérsékleti elektron-koncentráció $10^{15}-10^{17}$ cm^{-3} , esetenként 10^{15} cm^{-3} -nál kisebb volt, a növesztési körülményektől függően. A szoba-hőmérsékleten mért legmagasabb mozgékonyág érték kb. 7000 cm^2/Vs volt, míg 77 K-en 62 000 cm^2/Vs , de ezen a hőmérsékleten a jó rétegek ($n=(1-2) \times 10^{15}$ cm^{-3}) elektron-mozgékonyága alacsonyabb volt, kb. 30 000 cm^2/Vs . 4,2 K-en a legmagasabb mért mozgékonyág érték kb. 11 000 cm^2/Vs volt. A 2. és 3. ábrákon bemutatjuk a tipikus töltéshordozó koncentráció és mozgékonyág



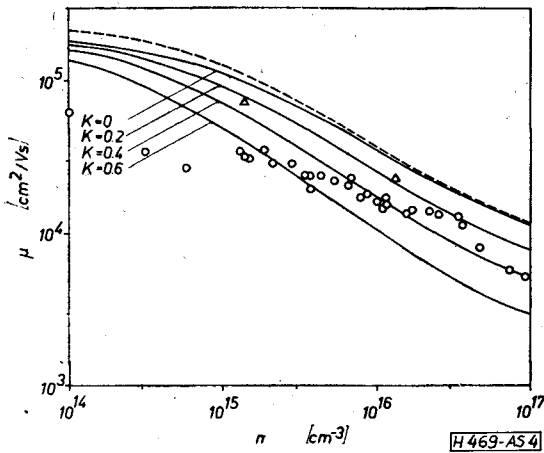
2. ábra. GaAs epitaxiális rétegek elektrokoncentrációja a hőmérséklet függvényében



3. ábra. GaAs epitaxiális rétegek elektron-mozgékonyága a hőmérséklet függvényében

konyság görbéket a hőmérséklet függvényében. A görbék részletes diszkusziójára itt nem térünk ki, erre vonatkozólag ld. [5, 10, 11, 18].

Az elektron-mozgékonyásnak a töltéshordozó koncentráció függésében való mérése alkalmasan megválasztott hőmérsékleten lehetővé teszi a donork és akceptorok koncentrációjának, valamint a kompenzációs foknak ($K=N_{akc}/N_{don}$) a meghatározását. Ezt a mérést célszerű 77 K-en elvégezni, s a mérési adatoknak elméletileg számított görbesereggel való összevetésével lehet a kívánt paramétereket meghatározni [10]. Az általunk számított görbesereget és a reprezentatív mérési eredményeket a 4. ábra mutatja be. Nagyszámú, azonos rendszerben növesztett epitaxiális réteg adatainak analízise alapján megállapítottuk, hogy kb. 10^{16} cm^{-3} töltéshordozó koncentráció felett a rétegek tipikus kompenzációs foka $K=N_a/N_d=0,2-0,4$, míg ez az érték 10^{16} cm^{-3} elektron-koncentráció alatt fokozatosan 0,6-ra növekszik. Ezen adatok alapján megbe-



4. ábra. GaAs epitaxiás rétegekben 77 K hőmérsékleten mért elektron-mozgékonyosság az elektron-koncentráció függvényében (O). Folytonos vonalak jelölik a különböző $K = N_a/N_d$ kompenzációs fok esetére számított elméleti görbéket $\mu_{\text{rács}} = 200\,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ esetén, és szaggatott vonal a $\mu_{\text{rács}} = 250\,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ esetben, kompenzáció nélkül. Δ — irodalmi maximális értékek

csülhető az adott technológiai eljárás mellett a háttér akceptor koncentráció határértéke, melyre kb. $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ érték adódott.

Az elektromos jellemzők, valamint a növesztési körülmények analizéséből arra következtetünk, hogy a folyadékfázisú epitaxiás rétegekben a domináns szennyező az amfoter jellegű szilícium, mely nagyobb-részt Ga-helyekre (donorként), kisebbrészt As-helyekre (akceptorként) épül be.

Az n^+ hordozóra növesztett n-típusú epitaxiás réteg legfontosabb minősítési eljárása az aktív réteg elektron-koncentrációjának és annak a rétegvastagság mentén való eloszlásának meghatározása. A töltéshordozó-koncentráció profil a Schottky-barrier záróirányú feszültségkapacitás karakterisztikájának mérésével határozható meg. A Schottky-barrier előállításához az n-típusú réteg felületén fém-félvezető átmenetet alakítunk ki, míg a réteg hordozó felőli oldalán ohmos kontaktust. A gyors, rutinszerű mérésekhez a fém-félvezető átmenetet üvegkapillárisban levő Hg elektróda szolgáltatja. Bár a Hg-GaAs kontaktus nem ad teljesen ideális Schottky-diódát, ez a koncentráció-profil vizsgálatánál nem okoz problémákat. Ily módon az n-típusú aktív réteg elektron-koncentrációja és a koncentráció mélység szerinti eloszlása gyorsan és roncsolásmentesen mérhető.

A koncentráció-profil mérése általában úgy történik, hogy alkalmas kapacitásmérő műszer segítségével pontról-pontra meghatározzuk a záróirányba előfeszített dióda C-V karakterisztikáját, majd a

$$w = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{C}$$

$$n(w) = -\frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0 e S^2} C^3 \frac{1}{dC} \frac{dC}{dV}$$

egyenletek segítségével (itt S a dióda, azaz a Hg kapilláris keresztmetszete, ϵ_r a GaAs relatív dielektromos állandója) kiszámítjuk a kiürített tartomány határát, w-t (a mélységi koordinátát), s a felszíntől

w távolságban a töltéshordozó koncentrációt, $n(w)$ -t [14]. A maximális behatolási mélységet (w_{max}) a Schottky-barrier dióda letörési feszültsége határozza meg. Tapasztalataink szerint a számunkra érdekes koncentráció tartományban ($n \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) a letörés a

$$\int_0^{w_{\text{max}}} n(x) dx \approx n w_{\text{max}} \approx 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

felületi töltéshordozó sűrűség értéknél következik be [9, 14]. Precízebb mérések céljaira Ni-GaAs Schottky-barrier diódákat készítettünk, a fémnek vizes oldatból való leválasztásával, s a diódának mesa-marással való kialakításával.

Méréseink szerint az n^+ -n epitaxiás szeletek n-típusú rétegeiben mért átlagos elektron-koncentráció jó egyezést mutatott a kísérő szeleten (felszigetelő szubsztrát) Hali-effektus segítségével mért elektron-koncentrációval. Az elektron-koncentrációnak a mélység szerinti profilja többé-kevésbé homogén volt, illetve a szubsztrát felé közeledve enyhén növekedett. Az n - n^+ határfelület környezetében nem detektáltunk anomális koncentrációváltozást.

2.3. Diódák kontaktálása és kiszerezése

A Gunn-diódák készítésének egyik legkritikusabb művelete a megfelelő tulajdonságokkal rendelkező ohmos kontaktusok kialakítása. A Gunn-diódák készítéséhez használt nagy tisztaságú n-típusú GaAs kis fajlagos ellenállású kontaktusának készítésére az Au-Ge-Ni, In-Ge-Ag és Sn-Ag anyagrendszereket próbáltuk ki. Vizsgálataink során az Au-Ge-Ni (88s%Au + 12s%Ge) + 5–10 s%Ni kontaktusrendszert találtuk a legmegfelelőbbnek, mind a katód, mind az anód oldali kontaktus céljára. Ez a kontaktus rendszer az alábbi előnyös tulajdonságokkal rendelkezik: a kontaktus ellenállás kicsi, jól tapad a GaAs-hez, felülete levegőn nem változik, a réteghez termokompresszióval rögzíthető a kivezetés.

A fent leírt kontaktus anyagot vákuumpárológatással kb. 10^{-7} torr vákuumban vittük fel a szeletre, mindkét oldalra egy ciklusban. A kontaktus réteg vastagsága kb. $0,4 \mu\text{m}$.*

Az elkészített kontaktusok minősítésére több módszert alkalmaztunk. Magán a szeleten, vagy szeletből lehasított morzsán rugós-tűs érintkezővel mértük az I-V karakterisztikát. A negatív differenciális ellenállás felléptéhez tartozó küszöbfeszültség U_k , és az epitaxiás réteg d vastagságából meghatározható az átlagos küszöb-térférfősség; $E_k = U_k/d$. Jó kontaktusnál ez az érték kb. 3,3 kV/cm kell, hogy legyen. Ha ennél lényegesen nagyobb, akkor túl nagy a soros kontaktus ellenállás, a szeletből nem, ill. csak rossz hatásfokú dióda készíthető.

A kontaktus ellenállást kvantitatíve a diódamorzsán, az Intézetben kidolgozott, szögtől függő geometriai mágneses ellenállásváltozás mérés módszerével lehet mérni [6, 15].

A diódamorzsza ellenállásának mérése mágneses térben a mágneses tér és a kontaktus síkja között be-

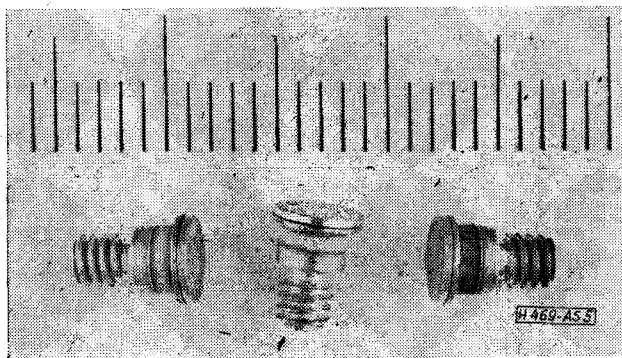
* A Gunn-dióda kontaktuskészítési és kiszerezési eljárásának szabadalmaztatása folyamatban van.

zárt szög függvényében lehetővé teszi a kontaktus ellenállás és a mozgékonyág egyidejű meghatározását. A mérés alapja, hogy a szögtől függő geometriai mágneses ellenállás a következő alakban írható:

$$R_M = R_0 \frac{A(H)}{1 + B(H) \cos^2 \varphi} + R_c$$

ahol R_c a kontaktus ellenállás és $A(H)$ és $B(H)$ tartalmazza a félvezető anyag galvanomágneses állandóit és a mágneses térerősséget, φ a mágneses tér iránya és a felület normál vektora közötti szög. Ez a módszer nagyobb mágneses térerősségek (> 10 kG) esetén használható; előnye, hogy egyetlen méréssel meghatározható belőle a kontaktus ellenállás és ennek ismeretében a mozgékonyág az adott eszközben. A jó diódák a kontaktusok ellenállása kisebb, mint a dióda teljes ellenállásának 3–4%-a.

Az előzetesen minősített szeleteken a félvezetőtechnikában szokásos maratási eljárásokkal kb. 80 μm átmérőjű, 5 μm magas szigeteket („mesa”) alakítottunk ki, majd a szeleteket daraboltuk, az egyes darabokat tokba forrasztottuk, kivezető huzallal láttuk el és a tokot lezártuk. A diódák tokozására az AV 173 típusú mikrohullámú diódatokat használtuk. A diódák fényképe az 5. ábrán látható.



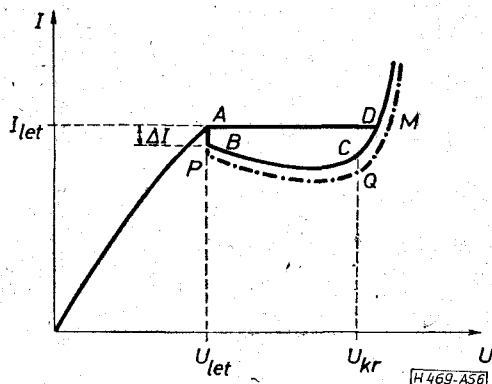
5. ábra. Kész Gunn-diódák

3. Dióda-minősítő mérések

3.1. Egyenáramú, illetve alacsony frekvenciás paraméterek

Az elkészített diódák a következő statikus, illetve alacsony frekvenciás elektromos paramétereket mértük: statikus (üzemi) áram-feszültség karakterisztika, impulzus (izotermális) áram-feszültség karakterisztika, töltéshordozó mozgékonyág az aktív n-típusú rétegben, kritikus feszültség és áram (impulzus üzemben) a hőmérséklet függvényében.

Az áram-feszültség karakterisztika mérésére épített berendezés [7, 16] alkalmas egyenáramú, ill. különböző szélességű és ismétlődési frekvenciájú impulzusokkal az impulzus üzemi $I-V$ karakterisztikák, továbbá a dinamikus differenciális vezetés mérésére. Mivel a Gunn-eszközök mérésekor amplitúdó modulált nagyfrekvenciás rezgések (frekvenciájuk néhányszor 10 MHz) is keletkeznek, a mérőrendszer gerjedésének megakadályozására a diódával párhuzam-



6. ábra. Gunn-dióda idealizált karakterisztikája

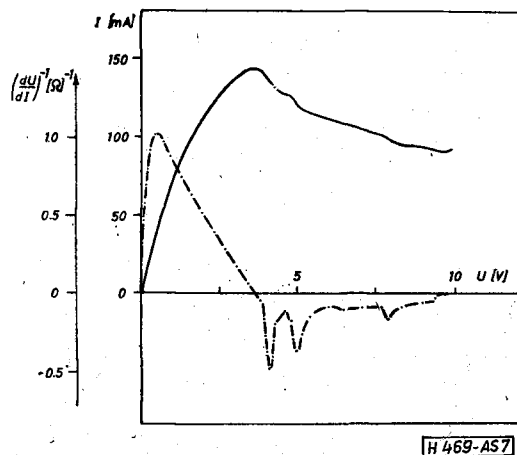
osan RC-tagot kapcsoltunk. A dióda $I-V$ jelleggörbéjét a mérőműszer automatikusan felrajzolja. A 6. ábrán a Gunn-dióda idealizált áram-feszültség karakterisztikája látható [16].

Az OABCD az egyenáramú, az OAPQ a nagyfrekvenciás jelleggörbe. Az AM szakasz akkor figyelhető meg, ha domén nem alakul ki, PQ ha a domén létrejön. A diódára adható legnagyobb feszültség U_{KR} , felette az eszközben átütési folyamatok kezdődnek.

A Gunn-jelenség nagyjelű instabilitás, azaz a rezgések rögtön nagy amplitúdóval kezdődnek, ezért a letörési feszültségnél az áram ΔI -nyi értéket változik. Az alacsonyfrekvenciás $I-V$ karakterisztika a nagyfrekvenciás és a domén hiányában kialakuló karakterisztika között helyezkedik el, konkrét menete a mérőkör és az eszköz kölcsönhatásától függ [16].

A 7. ábrán bemutatjuk egy tipikus, általunk készített Gunn-dióda $I-V$ karakterisztikáját, valamint a differenciális vezetőképességet a dióda feszültségének függvényében. Jól látható, hogy a küszöbfeszültség felett a dióda differenciális ellenállása negatív, tehát aktív elem funkcióját képes ellátni elektronikus áramkörökben.

A dióda aktív n-típusú rétegében az elektronok mozgékonyága a kész tokozott eszközön való méréssel is meghatározható. A mérés egyébként ohmikus kontaktussal ellátott kristálydarabon is elvégezhető. A kis térben mért töltéshordozó mozgékonyág az



7. ábra. Gunn-dióda tipikus áram-feszültség és differenciális vezetőképesség-feszültség karakterisztikája

eszköz fontos konstrukciós, illetve technológiai paramétere, mivel az áram csúcs/völgy arány, és így a negatív differenciális ellenállás nagysága ettől függ.

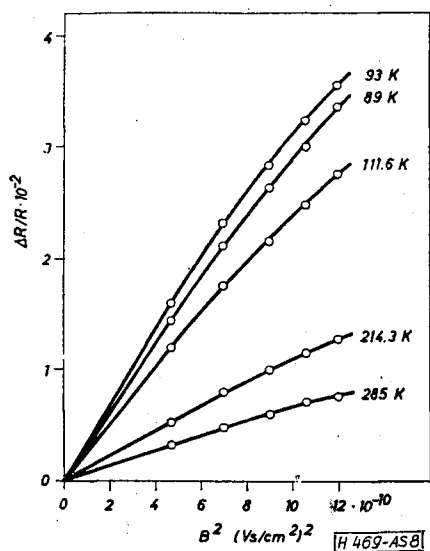
A dióda aktív rétegében az elektronok mozgékony-sága az $I-V$ karakterisztika kezdeti nehézségének és a kritikus térerőnek, illetve az eszköz vagy n^+-n szerkezet geometriai mágneses ellenállás változásának mérésével határozható meg [9, 19].

Könnyen megmutatható, hogy tranzverzális mágneses térben, a kontaktus ellenállás elhanyagolásával, a keresztirányú méreteihez képest rövid epitaxiás réteg, illetve Gunn-dióda aktív réteg ellenállásának változása

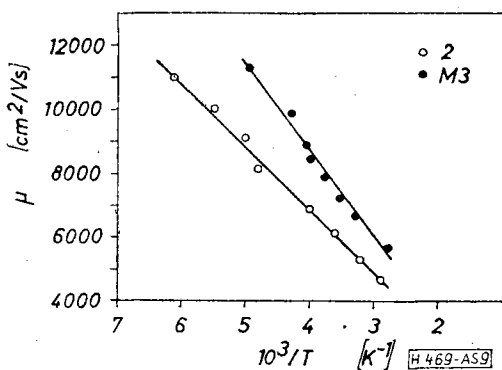
$$\frac{\Delta R}{R} = \xi \mu_H^2 B^2 \cong \mu_H^2 B^2$$

mivel jó közelítésben $\xi \cong 1$ [9], μ_H a Hali-mozgékony-ság. A 8. ábrán különböző hőmérsékleten végzett mágneses ellenállás-változás mérések eredményei láthatóak, az egyenesek meredeksége közvetlenül szolgáltatója az elektronok mozgékony-ságát.

A 9. ábrán az elektron-mozgékony-ság két diódán mért értékeit mutatjuk be a hőmérséklet függvényében. A jó diódákon a szoba-hőmérsékleten mért elektron-mozgékony-ság 5500–7000 cm^2/Vs volt, meg-



8. ábra. Mágneses ellenállásváltozás a mágnes-tér függvényében diódamorzsn mérve



9. ábra. Elektronmozgékony-ság a dióda aktív rétegében

felelő egyezésben az ellenőrző szeleteken végzett közvetlen galvanomágneses mérések eredményeivel.

A Gunn-diódák aktív rétegében mérhető elektron-mozgékony-ság hőmérséklet függésén kívül, mértük diódáinkon a küszöb-feszültség és a küszöbáram értékeit a -100 és a $+70$ °C hőmérsékleti tartományban. A dióda geometriai adatainak ismeretében a mérések eredményeiből meghatároztuk az elektronok csúcsebességét, és a Gunn-effektusra jellemző kritikus térerőt. Mindkét mennyiség nagyságára és hőmérséklet függésére nyert eredmények jól egyeznek a más módszerekkel mért irodalmi adatokkal. Részletekre vonatkozóan ld. [19].

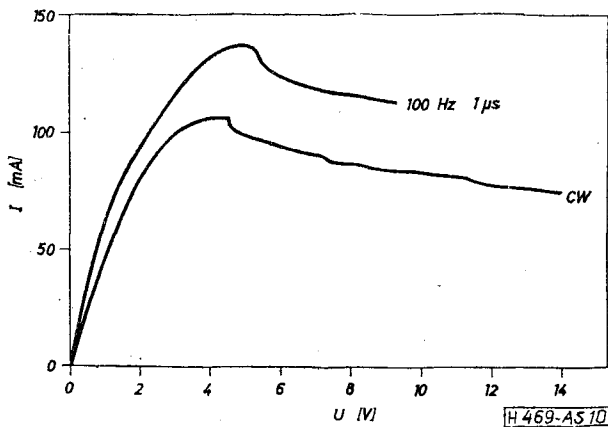
4.2. A hőellenállás mérése

A dióda R_T hőellenállása az $R_T = \Delta T/P$ összefüggéssel definiálható, ahol P az eszközben disszipált teljesítmény, ΔT az aktív réteg hőmérsékletemelkedése a környezethez képest. Nagy teljesítménysűrűséggel dolgozó félvezető eszköz esetén a hőellenállás értékének meghatározása és alacsony szinten való tartása alapvető fontosságú.

A Gunn-dióda hőellenállása az aktív réteg, az aktív réteg és a hőelvezető hűtőtömb közé iktatott különböző kontaktus és felforrasztó rétegek hőellenállásából, továbbá az általában rézből készült hűtőtömb kifolyási hőellenállásából adódik.

Mind a disszipált teljesítmény, mind pedig a különböző rétegek hővezető képessége a dióda felületével arányos, így hőelvezetési szempontból optimalizálni csak a dióda sugarával arányos kifolyási ellenállást, illetőleg a felforrasztó és kontaktus rétegek hosszát lehetséges. Ez okozza, hogy a diódát kívánatos az aktív oldalával a hűtőtömb felé („face down” szerkezet) felforrasztani. Az igen nagy teljesítmény sűrűség miatt még a kis hatásfokú elemek esetében is a dióda átmérője rendkívül kicsinek adódik (60–100 μm), ami a mikroelektronikában szokásos diszkrét méretek alsó határán van. A kis méret miatt a hőmérséklet közvetlen mérésével a hőellenállás vagy a dióda működési hőmérséklete nem határozható meg, az egyedül lehetséges infravörös, mikroszkópiai direkt mérés kevésbé pontos. Így a hőmérséklet kizárólagosan másodlagos hatásával, a dióda elektromos adatainak megváltozásával célszerű mérni. A szokásos mérési eljárásoknál a tényleges Gunn-dióda jelleggörbéinek a megváltozásával lehet hőmérsékletet mérni. Egyik lehetőség, ha igen rövid impulzusokkal a Gunn-dióda negatív differenciális ellenállású tartományának megjelenéséhez tartozó csúcstartamot mérjük, mely függ a hőmérséklettől. Ha az impulzusok hossza elegendően rövid (a gyakorlatban rövidebb, mint 1 μs) és az ismétlődés frekvenciája alacsony (~ 100 Hz), akkor az impulzusok alatt a dióda hőmérséklete nem változik meg, így a különböző hőmérsékleten (termosztátban) elvégzett impulzus üzemi karakterisztikák és a tényleges folyamatos üzemből működő dióda karakterisztikájának az összehasonlításából az aktív tartomány hőmérséklete meghatározható.

A diódák hőellenállásának mérésére a fenti módszert alkalmaztuk. A 10. ábrán ilyen mérés eredménye látható. Az ábrán bemutatjuk egyazon diódán

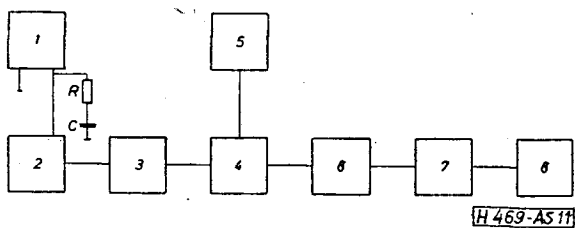


10. ábra. Gunn-dióda áram-feszültség karakterisztikái, egyen-
áramú és impulzus üzemben

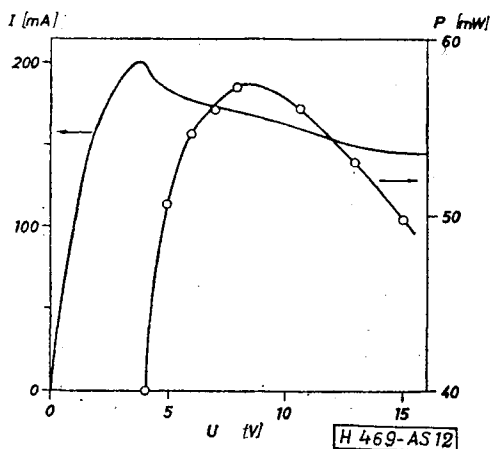
folyamatos üzemben és különböző impulzusokkal mért áram-feszültség karakterisztikákat. Az impulzus-szélesség növelésével a csúcsáram csökkent, tehát nőtt az aktív réteg hőmérséklete.

3.3 Nagyfrekvenciás paraméterek

Az eszköz egyenáramú paramétereinek vizsgálata után mértük az üregbe helyezett dióda nagyfrekvenciás paramétereit. A 11. ábrán a nagyfrekvenciás mérőrendszer elrendezése látható. Az RC taggal söntölt, a 2 üregbe helyezett dióda által keltett rezgések a 3 izolátoron keresztül a 4 iránycsatlón át vagy az 5 analizátorba, vagy a 6 hullámhosszmérőbe és a 7 attenuatorba és onnan a 8 teljesítménymérőbe jutnak. A dióda táplálását a stabilizált tápegységről végezzük,



11. ábra. Gunn-dióda nagyfrekvenciás bemérésének tömb-
vázlata



12. ábra. Mikrohullámú teljesítmény a munkaponti feszültség
függvényében

Néhány tipikus Gumi-dióda jellemző adata

Sorszám	1 U_{th} [V]	2 I_{th} [mA]	3 U_B [V]	4 I_B [mA]	5 P [mW]	6 Hatásfok [%]
1.	3,6	136	7	98	65	9
2.	3,9	200	7	157	65	6
3.	3,7	227	7	156	69	6
4.	3,8	198	7	165	58	5
5.	3,7	194	7	153	52	5
6.	3,9	203	7	166	52	4
7.	3,7	227	7	156	70	6

AZ OSZLOPOK JELENTÉSE:

- 1 - A kritikus térerő elérésekor a mintán levő feszültség
- 2 - A kritikus térerő hatására a mintán átfolyó áram
- 3 - Munkaponti feszültség
- 4 - Munkaponti áram
- 5 - A leadott mikrohullámú teljesítmény
- 6 - Az átalakítás hatásfoka

mivel a tápfeszültség-változás frekvenciaváltozást okoz (jellemző érték ~ 10 MHz/V). A diódát soros RC vagy soros C körrel söntöljük, ez megakadályozza a dióda által keltett 40–50 MHz körüli frekvenciájú jelek kijutását. Irodalmi adatok, és saját méréseink is azt mutatják, hogy a dióda tulajdonságai erősen függenek az alkalmazott mérőrendszertől, elsősorban a méréshez használt üregtől, ill. a dióda üregben belüli helyzetétől, ezekkel a dióda hangolható is.

A 12. ábrán egy tipikus dióda $I-V$ karakterisztikája és a mikrohullámú teljesítmény feszültségfüggése látható. A diódák általában a küszöbfeszültség 1,5–2-szeres értékénél adják le a maximális teljesítményt. A leadott teljesítmény, ill. a frekvencia függ az eszköz és az üreg hőmérsékletétől, működőképességüket az eszközök széles hőmérsékleti tartományban megtartják. Az MTA MFI-ben készült diódákon végzett mérések azt mutatták, hogy az eszközök -40°C és a $+70^\circ\text{C}$ közötti hőmérséklet-tartományban működnek, ezen hőmérsékletváltozás hatására a csúcsáram kb. 40%-ot és a letörési feszültség kb. 10%-ot változik. Néhány dióda jellemző adatait az 1. táblázatban foglaltuk össze.

4. Összefoglalás

A Gunn-diódák fejlesztése során különböző konstrukciójú eszközöket készítettünk és a kifejlesztett mérés technika segítségével választottuk ki a legmegfelelebbeket. A munka során egy sor olyan technológiai műveletet valósítottunk meg (növesztés, felületelőkészítés, fémezés, kiserelés), amely további GaAs alapú félvezető eszközök fejlesztéséhez is szükséges és alkalmazható. Ezen technológiai műveletek természetesen eltérnek az elemi félvezetőkből készült eszközök technológiájában használt módszerektől.

Az elkészített diódákat a Távközlési Kutató Intézetben is minősítették, és a mérések azt mutatták, hogy a kifejlesztett eszközök a forgalomban levő kereskedelmi termékekkel egyenértékű tulajdonságokat mutattak. Ezekért a mérésekért köszönetünket fejezzük ki dr. Bercei Tibornak és munkatársainak.

I R O D A L O M

- [1] Székely V., Tarnay K.: A Gunn-dióda, Híradástechnika 1969.
- [2] J. E. Carroll: Hot Electron Microwave Generators, Arnold, London, 1970, Chapter 3.
- [3] P. J. Bulman, G. S. Hobsen, B. C. Taylor: Transferred Electron Devices, Acad. Press, London and New York, 1972.
- [4] C. M. Wolfe, G. E. Stillmann: High Purity GaAs, Proc. 3th Symp. on GaAs and Related Compounds, Aachen, 1970, Institute of Physics, London, 1970, p. 3—17.
- [5] B. Pődör, N. Nádor, I. Bertóti, J. Haggyó: Current carrier scattering and electrical properties of liquid phase epitaxial GaAs, MFKI Közleményei, 0—9 61—74 1973.
- [6] L. Gútai, I. Mojzes: Direct determination of the contact resistance of Gunn devices by strong field GMR, 4th European Solid State Device Research Conference, Nottingham, 1974.
- [7] Henk K., Szentpáli B., Mojzes I.: Gunn-oszcillátorok és az előállításhoz használt szerkezetek vizsgálata impulzus üzemi méréssel, MFKI Közleményei, 0—14 153—161 1974.
- [8] Mojzes I.: GaAs alapú Gunn-oszcillátorok néhány technológiai és vizsgálati tapasztalata, MFKI Közleményei 0—14 109—124 1974.
- [9] I. Mojzes, B. Szentpáli, I. Bertóti, B. Pődör: Measurement of electron concentration of n-n⁺ epitaxial layers grown for Gunn diodes, Proceedings of the 5th Colloquium on Microwave Communication, Budapest, June 24—30. 1974. Akadémiai Kiadó 1974, Vol. V. p. 233—240.
- [10] B. Pődör, N. Nádor, I. Bertóti: Investigation of the electrical properties of epitaxial GaAs layers for microwave devices, Proceedings of the 5th Colloquium on Microwave Communication, Budapest, June 24—30, 1974. Akadémiai Kiadó 1974, Vol. V. p. 279—290.
- [11] B. Pődör, N. Nádor: The lattice limited mobility of electrons in GaAs, Acta Physica Hung. 37 317—328 1974.
- [12] T. Sebestyén, H. Hartnagel, L. Herron: New method for producing ideal metal-semiconductor ohmic contacts, Electronics Lett. 10 372—373 1974.
- [13] T. Sebestyén, H. Hartnagel, L. Herron: New design criteria of Gunn diode contacts, Proc. 5th Int. Symp. on GaAs and Related Compounds, Deauville, France, 1974, Institute of Physics, London, 1974, p. 77—88.
- [14] Szentpáli B.: Epitaxiás rétegek vizsgálata fém-félvezető diódák segítségével, MFKI Közleményei 0—14 125—136 1974.
- [15] L. Gútai, I. Mojzes: Determination of semiconductor-metal contact resistance by an angle-dependent geometrical magnetoresistance method, Appl. Phys. Lett. 26 325—326 1975.
- [16] Lác J., Mojzes I.: Mérőberendezés Gunn-diódák impulzus és folyamatos üzemi mérése, MFKI Közleményei 0—16 109—122 1975.
- [17] Mojzes I.: GaAs-re készített Gunn-diódák ohmos kontaktusainak mérési problémája, MFKI Közleményei 0—16 77—83 1975.
- [18] B. Pődör, N. Nádor, I. Bertóti: On the role of space-charge scattering in epitaxial GaAs, phys. stat. sol. (a) 29 173—182 1975.
- [19] Í. Mojzes, B. Pődör, I. Balogh: On the temperature dependence of the threshold current and voltage of GaAs Gunn diode, phys. stat. sol. (a), publikálás alatt.
- [20] T. Sebestyén, H. Hartnagel, L. Herron: Thin-phase epitaxy for good semiconductor metal contacts, IEEE Transactions on Electron Devices, ED—22, 1073—1975.
- [21] T. Sebestyén, M. Menyhárd, D. Szigethy: In situ measurements of arsenic losses during annealing of the usual evaporated contacts of GaAs Gunn-diodes, Electronics Letters, 12 96—97 1976.
- [22] Sebestyén T., Wohn B., Szijj I., Mojzes I.: Mikroforrasztó berendezés a Gunn-diódák kontaktálásához. Előadás „A szilárdtestkutatás korszerű berendezései” c. nemzetközi konferencián, Abstract kötet 28/1—3 oldal. Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 1973, Szept. 25—28.
- [23] G. Pataki: Velocity and current determination for steadily travelling domains in semiconductors, Phys. Letters, 26A 24—25 1967.
- [24] Bertóti I.: Félvezetők epitaxiás növesztése folyadékfázisból, A szilárdtestkutatás újabb eredményei, Akadémiai Kiadó, Budapest 1976, 1. kötet, 59—152.